
سلسلة مقدمات موجزة
علم الأحياء الفلكية
ديفيد سي كاتلنغ
ترجمة
فاطمة غنيم

سلسلة مقدمات موجزة

علم الأحياء الفلكية

ديفيد سي كاتلنغ

ترجمة: فاطمة غنيم

مراجعة: عمر الأيوبي

QH326 .C38125 2021

Catling, David C,

علم الأحياء الفلكية / تأليف ديفيد سي كاتلنغ ؛ ترجمة فاطمة غنيم ؛ مراجعة عمر الأيوبي. - ط. 1.
- أبوظبي : دائرة الثقافة والسياحة، كلمة، 2021.

(سلسلة مقدمات موجزة)

ترجمة كتاب: Astrobiology: A Very Short Introduction

تدمك: 978-9948-33-039-4

1- الأحياء الفضائية. 2- الأحياء- علم. 3- الحياة على الكواكب.

أ- غنيم، فاطمة. ب- أيوبي، عمر. ج- العنوان. د- السلسلة.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنجليزي:
Astrobiology - A Very Short Introduction by David C. Catling

صدر بموافقة مكتب تنظيم الإعلام - وزارة الثقافة والشباب تحت رقم الطلب -MC-03-01
3787377.
طبع في المتحدة للطباعة والنشر- أبوظبي- 80022220


كلمة
KALIMA


مركز أبوظبي
للغة العربية
Abu Dhabi Arabic
Language Centre

علم الأحياء الفلكية

المحتويات

المحتويات

قائمة الصور والرسوم الإيضاحية

قائمة الصور والرسوم الإيضاحية

رسم تخطيطي للمؤلف.

9. أقمــار غاليليو التابعـة للمشتري: آيو ويوروبا وغانيميد وكاليستو...**196**

ناسا/ مختبر الدفع النفاث/ مركز الفضاء الألماني.

شكر وتقديـر

شـكر وتقديـر

يطيب لي أن أتوجه بالشكر للبروفيسور جون آرمسترونغ والدكتور روري بارنز والبروفيسور جون باروس والدكتور بيلي برازيلتون والبروفيسور روجر بويك والدكتورة راشيل هوراك وإيميلدا كيربي والبروفيسور وودي سوليفان، لتفضُّلهم بقراءة أجزاء من الكتاب وإبداء تصويبات واقتراحات مختلفة. وأشكر كذلك لاذا مينون وميمي ساوثوود، اللتين قرأتا الكتاب كاملاً، وعرضت ساوثوود وجهة نظر غير العلماء في الكتاب. وما أعانني على الاستعداد ذهنياً لتأليف هذا الكتاب، الجمع الغفير من الطلاب الذين حضروا المحاضرات التي ألقيتها عن علم الأحياء الفلكية في جامعة واشنطن على مرّ السنين. وأشكر لإيما ما ولاذا مينون، من دار نشر جامعة أكسفورد، على ما قدّمتاه لي من تشجيع ومساعدة.

الفصل الأول ما علم الأحياء الفلكية؟

الفصل الأول
ما علم الأحياء الفلكية؟

ما وراء الاسم

«ما علم الأحياء الفلكية؟»، هكذا صاح عميل جهاز الخدمة السرية الأمريكية في جهازه اللاسلكي. كان منذ لحظات يتحقق من هوية زائر أكاديمي لمركز أميس للأبحاث (Ames Research Center)، التابع للإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا)، بالقرب من سان فرانسيسكو. قال الزائر إنه جاء لحضور أول مؤتمر علمي لناسا عن علم الأحياء الفلكية. يشتمل مركز أميس على مهبط طائرات يتيح موقعاً آمناً تحطّ فيه طائرة الرئاسة الأمريكية، وفي أبريل 2000، كان الرئيس بيل كلينتون قد وصل لتوّه لزيارة منطقة خليج سان فرانسيسكو، مصطحباً معه طاقم حراسته من رجال الخدمة السرية.

كان سؤال عميل الخدمة السرية منطقيّاً. فلم يحدث إلا في أواخر تسعينيات القرن العشرين أن برز إجماع علمي حول معنى علم الأحياء الفلكية، ولم يكن كثيرون، من العامة أو عملاء جهاز الخدمة السرية، قد سمعوا بهذا المصطلح. في ذلك الزمان، بدأت ناسا تروِّج لبرنامج بحثي مختصّ بعلم الأحياء الفلكية بقيادة مركز أميس، الذي كنت أعمل فيه عالِمَ فضاء. في البداية، لم يُعجب بعض زملائي المعنى اليوناني الحرفي لمصطلح «علم أحياء النجوم» (astrobiology)، وتساءل أحدهم متهكِّماً: «كيف لا يمكن للحياة أن توجد في قلب جحيم النجوم؟» أما التفسير البسيط فهو أن كلمة «astro» (نجم) في مصطلح «علم الأحياء الفلكية» تتعلق بالحياة حول النجوم، بما فيها الشمس، أو ببساطة الحياة في الفضاء. والواقع أن الكثير من علماء الأحياء الفلكية مهتمون بتاريخ الحياة على الأرض قدر اهتمامهم بالحياة في أماكن أخرى، إذ يُجمع علماء الأحياء الفلكية على ضرورة أن يكون لدينا فهم راسخ لكيفية تطوُّر الحياة على الأرض لكي نمعن النظر في وجود حياة في الفضاء الخارجي. لكن أحد الجوانب المذهلة للعلم الحديث أنه أخفق حتى الآن في الإجابة عن أسئلة حول علم الأحياء قد يطرحها الأطفال أيضاً. فكيف بدأت الحياة على الأرض؟ لدينا بعض الأفكار، لكن التفاصيل غير معروفة. وما السمات الخاصة التي تتميّز بها الأرض والمجموعة

الشمسية وتجعل كوكبنا صالحاً للسكنى؟ من جديد، لدينا بعض الأفكار، لكن الطريق ما زالت أمامنا طويلة. وما الذي جعل الحياة تتطوّر إلى كائنات حيّة معقّدة بدلاً من استمرارها على بساطتها؟ من جديد، لسنا على يقين.

لسدِّ هذه الفجوات في المعرفة البشرية، ظهر علم الأحياء الفلكية بوصفه «فرعاً من العلم المعنيّ بدراسة أصل الحياة وتطوّرها على الأرض، وضرباً من الحياة المحتملة في أماكن أخرى». هذا هو تعريفي المفضل. وقد عرّفت ناسا علم الأحياء الفلكية بأنه «دراسة أصول الحياة وتطوّرها وتوزيعها في الكون ومستقبلها». ومن التعريفات الشائعة الأخرى، «دراسة الحياة في الكون، أو دراسة الحياة في سياق كوني». وفي هذا المجال، يسعى علماء الأحياء الفلكية إلى الإجابة عن السؤال: «ما تاريخ الحياة على الأرض وما مستقبلها؟» و«هل توجد حياة في أماكن أخرى»؟

تزامنت أربعة تطوّرات مع ظهور علم الأحياء الفلكية بمثابة علم في أواخر التسعينيات. ففي عام 1996، وصف العلماء علامات مثيرة للجدل على وجود حياة قديمة داخل حجر نيزكي من المريخ، وهو صخرة تزن 1.9 كيلوغرام أطيح بها من سطح المريخ عقب اصطدام كويكب به وسقطت في النهاية في القارّة القطبية الجنوبية. وسواء أكان تفسير الحياة المجهرية الأحفورية صحيحاً أم لا (انظر الفصل السادس)، فإنه دفع الناس إلى التفكير. علاوة على ذلك، أثبت علماء الأحياء على مدى العقدَين السابقَين أن بعض الميكروبات لا تتحمّل العيش في مجموعة من البيئات أكبر كثيراً مما كان يُعتقد سابقاً فقط، وإنما تزدهر فعلاً في درجات الحرارة العالية أو في الأوساط الحمضية أو تحت الضغط أو الأوساط الملحية. لذا صار من المعقول أن نتأمل في مسألة وجود ميكروبات خارج الأرض في بيئات تبدو غير ملائمة. وجاء اكتشافٌ ثالثٌ في عام 1996 عن طريق الصور التي التقطها مسبار ناسا «غاليليو» لسطح قمر المشتري يوروبا، المكسو بالجليد، إذ كشفت عن قطع جليدية تباعدت عن بعضها بعضاً في ماضي الزمان، ما يشير إلى وجود محيط أسفل قشرة جليدية. بعدئذٍ، واعتباراً من منتصف التسعينيات فصاعداً، عثر الفلكيون على أعداد متزايدة من الكواكب خارج المجموعة الشمسية أو الكواكب الخارجية، وهي كواكب لا تدور حول شمسنا، وإنما حول نجوم أخرى. وقد أعطت إمكانية وجود حياة على الكواكب الخارجية أو في الفناء الخلفي الكوني لمجموعتنا الشمسية زخْماً للسؤال عما إذا كان يُحتمل أن تكون الحياة شائعة في الكون.

علم الأحياء الفلكية في تاريخ الأفكار

على الرغم من بروز علم الأحياء الفلكية على الساحة في التسعينيات، فإن مسألة ما إذا كنا نعيش وحدنا في هذا الكون أم أن هناك غيرنا تعود إلى آلاف السنين. فقد اعتنق طاليس (Thales، نحو 600 ق.م) - الذي يَعدُّه كثيرون أبا الفلسفة الغربية - فكرة وجود عوالم متعدّدة بها حياة. وفي وقت لاحق، حظيت مثل هذه «التعدّدية» بتأييد المدرسة الذرية اليونانية - من ليوسيبوس

(Leucippus) إلى ديموقريطوس (Democritus) وإبيقور (Epicurus) - التي كانت تؤمن بأن المادة مصنوعة من ذرات غير قابلة للتجزئة. كتب مطروذورس (Metrodorus، نحو 400 ق.م)، وهو من أتباع ديموقريطوس: «ليس طبيعيّاً في حقل كبير أن يكون لديك نبتة قمح واحدة فقط، وليس طبيعيّاً في الكون اللامتناهي أن يكون لديك عالم حيٌّ واحدٌ فقط». لكن من المجافي للصواب أن نساوي بين التعدّدية التي قال بها الفلاسفة القدماء ومفهومنا الحديث للحياة على كوكب المريخ أو على الكواكب الخارجية. فلم يكن مطروذورس يعلم أن النجوم أجرام شبيهة بالشمس موجودة على مسافات هائلة، وإنما كان يعتقد أنها تتكوّن يومياً من الرطوبة الموجودة في الغلاف الجوي للأرض. كانت العوالم المأهولة التي تخيّلها أتباع المذهب الذري أجراماً في فضاء غير ملموس، على نحو أشبه بالأفكار الحديثة عن الأكوان الموازية. على أيِّ حال، كانت الغلبة في النهاية لفكرة أفلاطون (427-347 ق.م) وأرسطو (384-322 ق.م) المعارضة لهذا المذهب. وعلى مدى أكثر من ألف عام، ساد اعتقادهما القائل بانفراد الأرض بالحياة واحتلالها مركز الكون.

في نهاية المطاف، أثبت فلكيُّو عصر النهضة أن الأرض تدور حول الشمس. ومع إدراك أن الأرض مجرد كوكب آخر، سرعان ما ثارت تكهّنات حول وجود حياة خارج كوكب الأرض على كواكب أخرى في المجموعة الشمسية. وتأمّل يوهان كبلر (Johannes Kepler، ا1571-1630)، الفلكي الألماني مكتشف القوانين الثلاثة لحركة الكواكب في علم الفلك، مسروراً بفكرة الكواكب المأهولة. ثمّ بحلول نهاية القرن السابع عشر، تصوَّر الفلكي الهولندي كريستيان هويغنز (Christiaan Huygens، ا1629-1695) وجود حياة خارج المجموعة الشمسية، قائلاً في كتابه «كوزموثيوروس» (Cosmotheoros، ا1698): «كل تلك الكواكب التي تحيط بذلك العدد الهائل من الشموس. لا بد أن لديها نباتاتها وحيواناتها، بل ومخلوقاتها العاقلة أيضاً». ولقيت فكرة وجود حياة خارج كوكب الأرض رواجاً شديداً، لدرجة أن الفيلسوف إيمانويل كانط (Immanuel Kant، ا1724-1804) كتب في عام 1755 عن وجود مخلوقات مثقّفة في المشتري ومخلوقات عاشقة في الزهرة.

بالمقابل، واصل بعض العلماء ذوي الرؤى الدينية تمسّكهم بانفراد الأرض بوجود مخلوقات حية عليها. ومن أمثلة هؤلاء وليام ويويل (William Whewell)، الأستاذ في جامعة كمبردج (1794-1866)، الذي عارض في كتابه «حول تعددية العوالمِ» (*Of the Plurality of Worlds*) ا(1853) فكرة وجود كواكب أخرى مأهولة، ما شكّل نوعاً ما باكورة نقاشٍ معاصر يسمى «فرضية الأرض النادرة» التي أتناولها في الفصل الثامن.

بحلول أواخر القرن التاسع عشر، كان يُنظر إلى مسألة وجود حياة في مكان آخر غير الأرض بوصفها مسألة علمية بحتة، على الرغم من أن العلم ذاته سرعان ما وصل إلى بعض الطرق المسدودة. تمخّضت الأرصاد بالمقراب التي قام بها جيوفاني سكيابارلّي (Giovanni Schiaparelli، ا1835-1910) وبيرسيفال لويل (Percival Lowell، ا1855-1916) عن طفرة في الاهتمام بإمكانية وجود مخلوقات ذكية على كوكب المريخ. وللأسف لم يكن اعتقاد لويل أنه رأى قنوات على كوكب المريخ سوى خدعة بصرية، تحدث عندما يحاول العقل إكمال الخطوط الناقصة في صورٍ ضبابية، وكانت أفكاره عن وجود حضارات على سطح المريخ محض

خيال. ويوماً بعد يوم، ومع استخدام الفلكيين أساليب دقيقة، مثل فحص أطياف الضوء الآتي من الكواكب، بات واضحاً أن الظروف الفيزيائية على أسطح مختلف كواكب المجموعة الشمسية ربما لا تكون مناسبة تماماً للحياة رغم كل ما سبق. وهكذا مالت الكفة بقوة في الاتجاه الآخر، لدرجة أنه بحلول منتصف القرن العشرين لم يكن من الفلكيين من يهتم بالكواكب إلا القليل. وتطلّب الأمر مجيء عصر الفضاء لكي تنبعث الحياة مجدّداً في ذلك الفضول القديم.

على الرغم من قِدم الأسئلة الأساسية المطروحة في علم الأحياء الفلكية، لم يكن مصطلح «علم الأحياء الفلكية» يظهر إلا بين الحين والآخر، قبل أن يشيع استخدامه في التسعينيات. ففي عام 1941، وصف مقال بعنوان «علم الأحياء الفلكية» كتبه لورانس لافلور (Laurence Lafleur)، أستاذ الفلسفة في كلية بروكلين في نيويورك، هذا المصطلحَ وصفاً أدقَّ من صيغته الحديثة بأنه دراسة الأحياء على غير كوكب الأرض. واستخدم أوتو ستروف (Otto Struve)، أستاذ الفلك في جامعة كاليفورنيا في بيركلي، أيضاً هذا المصطلح في عام 1955 ليصفَ البحث عن كائنات حية خارج كوكب الأرض. ونُشر كتابان لكل من عالم الفيزياء الفلكية الروسي غافربيل تيكوف (Gavriil Tikhov، ا1875-1960) في عام 1953، والفلكي الألماني يواكيم هيرمان (Joachim Herrmann) في عام 1974، بعنوان «علم الأحياء الفلكية»، تناولا فيهما الأفكار الشائعة عن وجود كائنات حية خارج كوكب الأرض.

أما الاستخدام الحديث لمصطلح «علم الأحياء الفلكية» فقد قدّمه في عام 1995 ويسلي هانترِس (Wesley Huntress)، الذي كان يعمل آنذاك في مقرّ ناسا في واشنطن العاصمة. كان علماء ناسا في ذلك الوقت يرون أن دراسة الأحياء على نطاقات تمتدّ من الميكروبات إلى الكون ضرورية لفهم الحياة في الكون. وراق لهانترِس مصطلح «علم الأحياء الفلكية» لهذا الطموح، فالتصق الاسم بهذا العلم.

والواقع أن علم الأحياء الفلكية كان في حقيقته إعادة اختراع وتوسيع لعلم الأحياء الخارجية (exobiology)، وهو مجال تعود جذوره إلى ما قبل ذلك بعدة عقود. ففي عام 1960، صاغ جوشوا ليدربرغ (Joshua Lederberg، ا1925-2008) مصطلح «علم الأحياء الخارجية» للإشارة إلى «تطوّر الحياة خارج كوكبنا». كان ليدربرغ، الحائز جائزة نوبل عن اكتشافاته في مجال الوراثيات الجرثومية، يرى أن البحث عن الحياة ينبغي أن يكون جزءاً أساسياً من استكشاف الفضاء. وعندئذٍ، من الستينيات فصاعداً، عملت ناسا بنصيحة ليدربرغ وموّلت أبحاث علم الأحياء الخارجية. لكن سرعان ما تعرّض علم الأحياء الخارجية للنقد. ففي عام 1964، قال جورج غايلورد سيمبسون (George Gaylord Simpson)، عالم الأحياء في جامعة هارفارد، متهكماً، إن هذا «العلم» لم يُثبت بعدُ أن الموضوع الذي يبحث فيه موجود أصلاً.

ميزة علم الأحياء الفلكية، كما نعرفه اليوم، أنه لا يقع تحت طائلة هجوم سيمبسون؛ لأنه يشمل في جوهره دراسة أصل الحياة وتطوّرها على الأرض. ويؤكّد علم الأحياء الفلكية أيضاً أصلَ الكواكب وتطوّرها بوصفها سياقاً للحياة، ومن ثمّ فإن مصطلح علم الأحياء الفلكية يشمل علماء الفلك بقوة أكبر من علم الأحياء الخارجية.

علم الأحياء الخارجية ليس هو المصطلح الوحيد المشابه لعلم الأحياء الفلكية. فمنذ عام 1982، استخدم الفلكيون رسمياً مصطلح «علم الفلك الحيوي» (bioastronomy) للإشارة إلى الجوانب الفلكية من البحث عن حياة خارج الأرض. وقبل ذلك، كان مصطلح «علم الأحياء الكوني» (cosmobiology) هو المفضَّل لدى جون ديزموند برنال (J. Desmond Bernal، 1901-1971)، عالم الكيمياء الفيزيائية المؤثِّر، البريطاني الأيرلندي المولد. لكن لم يحقق أيٌّ من هذه المصطلحات انتشاراً واسعاً.

ما معنى الحياة؟

يثير علم الأحياء الفلكية السؤال الصعب حول كيفية تعريف الحياة. فما الذي نبحث عنه بالضبط خارج الأرض؟ من النُّهج الشائعة إحصاءُ خصائص الحياة، التي تشمل التكاثر والنمو والاستفادة من الطاقة عبر الأيض والاستجابة للبيئة والتكيُّف التطوُّري والبنية المرتَّبة للخلايا والتشريح. من المؤسف أن طريقة تعريف الحياة هذه غير مُرضية، وذلك لسببين: أولهما أن القائمة المذكورة تصف ما تفعله الحياة لا ما تعنيه الحياة، وثانيهما أن معظم خصائص الحياة المذكورة ليست فريدة من نوعها. فالحياة تتسم بالترتيب البنيوي، مثل الخلايا، لكن بلورات الملح مرتّبة أيضاً. وبعض أصدقائي لم ينجبوا أطفالاً ومع ذلك فهم أحياء، والوصف نفسه يصدق على البغال التي، على حدِّ ظني، لا يمكن أن تتكاثر. وينطبق النمو والتطوّر على الكائنات الحية، لكنه ينطبق أيضاً على الحرائق وهي تنتشر. وينطبق الأيض على الكائنات الحية، لكنه ينطبق أيضاً على سيارتي التي تحوّل الوقود إلى طاقة حركية. والحياة تتفاعل مع بيئتها المحيطة، لكن مقياس الحرارة الزئبقي يستجيب أيضاً للأجواء المحيطة به.

بدلاً من ذلك، يحاول بعض العلماء تعريف الحياة باستخدام الديناميكا الحرارية، أيْ الحرارة والطاقة وعلاقتهما بالمادة، مقترحين أن جوهر الحياة يكمن في وجود بُنى مستقرة، مثل الخلايا والمادة الوراثية، إلى جانب «الإنتروبيا» الناتجة عن النفايات الأيضية والحرارة.

يتطلب مصطلح «الإنتروبيا» بعض التوضيح، فكثيراً ما يعمد المعلمون اليائسون الباحثون عن تفسير سريع مرتجل إلى وصف «الإنتروبيا» بأنها «فوضى». لكن «الإنتروبيا» ليست فوضى، وإنما هي مقياس دقيق لتشتّت الطاقة بين الجُسيمات، سواء أكانت ذرّات أم جزيئات. فالطاقة تتشتّت مكانياً، ومن ثمّ يمكن أن تتبدّد طاقة مجموعات الجُسيمات التي تتحرّك معاً، والتي يقال إنها طاقة «مترابطة». ومن ثمّ فإن الكرة المتقافزة تستقرّ على الأرض لأن طاقتها الحركية المترابطة تتحوّل إلى حركة حرارية غير مترابطة للجزيئات والذرات عن طريق الاحتكاك. في المقابل، لا تبادر الكرة الثابتة أبداً بالوثب من تلقاء نفسها (كما لو كانت حيّة)؛ لأنه على الرغم من وجود طاقة حرارية كافية في الأرضية التي تحتها، فإن هذه الطاقة غير متوافرة ومتفرّقة في التنطّط «القفز» العشوائي لذرات الأرضية. ويحكم القانون الثاني للديناميكا الحرارية مثل هذه الظواهر، وينص

على أن «الإنتروبيا» في الكون لا تنقص أبداً. والزيادة في «الإنتروبيا» (أو تشتّت الطاقة) تحافظ على الطاقة لكنها تفسد جودتها. فالطاقة العالية الجودة ليست موزّعة، وإنما مركّزة، مثل الطاقة التي في برميل من النفط، أو نواة الذرة، أو في الفوتونات (جُسيمات الضوء) ذات التردّد العالي والطول الموجي القصير. وتشمل هذه الفوتونات الأشعة فوق البنفسجية التي تسبّب الحروق الشمسية، والأشعة المرئية التي تمد الحياة النباتية بالطاقة. وفي علم الفيزياء، نجد أن هذه الطاقة العالية الجودة تتسم بإنتروبيا منخفضة.

الفيزيائي الذي ربط على نحو أبرز ما يكون بين «الإنتروبيا» والحياة هو إرفين شرودنغر (Erwin Schrödinger، 1887-1961)، الحائز جائزة نوبل. ففي كتابه «ما الحياة؟» (*What is Life?*) (1944)، علّق شرودنغر قائلاً إن الكائن الحي «يميل إلى الاقتراب من حالة «الإنتروبيا» القصوى الخطرة، وهي الموت. ولا يستطيع أن ينأى بنفسه عن حالة «الإنتروبيا» القصوى هذه، أي يبقى على قيد الحياة، إلا بالانسحاب المستمر من «إنتروبيا» بيئته السلبية... والواقع أننا في حالة الحيوانات الأرقى نعرف بدرجة معقولة نوع النظام الذي يغذيها، وأعني هنا حالة المادة الفائقة التنظيم في المُركَّبات العضوية المعقّدة نوعاً ما التي تخدمها بوصفها مواد غذائية. وبعد الاستفادة من هذه المادة، تعيدها في صورة متدهورة جدّاً». من المؤسف أن شرودنغر استحدث مفهوم «الإنتروبيا السلبية»، الذي لا وجود له في العلم، ليصف بنية الغذاء المنظمة. علاوة على ذلك، فإن زيادة «الإنتروبيا» في نمو بعض الكائنات الحية تأتي أولاً من توليد الحرارة لا من الصورة المتدهورة لنواتج النفايات الأيضية مقارنة بالطعام. وقد نوّه لينوس بولِنغ (Linus Pauling، 1901-1994) الذي يمكن القول إنه أعظم كيميائيِّي القرن العشرين، بصراحة إلى أن شرودنغر «لم يقدِّم أيَّ مساهمة من قريب أو بعيد [لفهمنا للحياة].. . بل ربما كان إسهامه سلبيّاً، بمناقشته «الإنتروبيا السلبية» فيما يتعلق بالحياة».

لكن أحد النواتج الثانوية المثيرة للفضول لـ«الإنتروبيا» المتزايدة دوماً في الكون هو أن البِنَى المنظَّمة منخفضة «الإنتروبيا»، مثل الكائنات الحية، تنبثق إلى الوجود انبثاقاً. والواقع أن «الإنتروبيا» تَنتُج على نحو فعَّال كأفضل ما يكون بواسطة ما يُسمى «البِنَى المبدِّدة» (dissipative structures) التي تنطوي على *بنيةٍ* مترابطة لعدد هائل من الجزيئات التي تبدِّد الطاقة. ومن الأمثلة البسيطة على ذلك خلية الحمل الحراري في الماء المغلي، إذ يصعد الماء الدافئ ويوازنه الماء الهابط على محيطه. وتساعد هذه الخلية الدوَّارة في تشتيت الطاقة ومن ثمّ تزيد «الإنتروبيا» بكفاءة أكبر مما لو كانت الخلية غير موجودة. وتُعدُّ جميع الكائنات الحية بِنى مبدِّدة معقدة. غير أن محاولات تعريف الحياة باستخدام الديناميكا الحرارية أخفقت حتى الآن في التمييز بوضوح بين الأحياء وغير الأحياء. على سبيل المثال، يعرّف الكاتب إريك شنايدر (Eric Schneider) الحياة بأنها «بنية مبدِّدة بعيدة كل البعد عن التوازن الذي يحافظ على مستوى تنظيمها الداخلي على حساب ما تنتجه من إنتروبيا بيئية». وهذا التعريف ينطبق أيضاً على الحريق.

بصرف النظر عن انتقادات بولينغ، رأى شرودنغر، مصيباً، أن الكائنات الحية يجب أن تشغّل نوعاً من برامج الكمبيوتر، وهو ما نسمّيه الآن «الجينوم». وربما يتعيّن على الحياة في أيِّ مكان

أن تشتمل على جينوم. ونعني بالجينوم مخططاً وراثياً معرَّضاً لأخطاء نسْخ صغيرة، وهو ما يسمح للكائن الحي بالتطوّر من سلفه ويوفّر صيغة لخصائص الحياة الأخرى، مثل الأيض. ويُعدُّ «التطور» - وهو التغيّرات التي تطرأ على المجموعات الأحيائية على مدى الأجيال المتعاقبة، والناتجة عن الانتقاء الطبيعي لخصائص الأفراد - أمراً مهمّاً لأنه العملية الوحيدة التي يمكنها تفسير تنوُّع الحياة وكيف تكوّنت سمات الحياة التي سردناها سابقاً. في آلية الانتقاء الطبيعي التي قال بها داروين، يعني التنوّع الوراثي لدى مجموعات الأفراد تكيُّف بعضِها بشكل أفضل من بعضها الآخر لتحقِّق نجاحاً تناسلياً أكبر. ويحابي الانتقاء الطبيعي الجينات التي تخلّف ذرية كبرى، إذ تتراكم السلالات في عمليات التكيُّف الجيني.

وإدراكاً لمحورية التطوّر، غالباً ما يعرِّف علماء الأحياء الفلكية الحياة بأنها «نظام كيميائي قائم بذاته وقادر على التطوّر الدارويني». لكن هذا التعريف لا يفيد للأسف إذا أردنا تصميم تجربة للعثور على الحياة. فهل يتعيّن علينا انتظار حدوث التطوّر لنحقِّق اكتشافاً إيجابياً؟ وهناك تعريف أفضل يستخدم صيغة الماضي: «الحياة نظام كيميائي قائم بذاته ويحتوي على جينوم اكتسب خصائصه عن طريق التطوّر». حتى الآن، لم تحاول تجارب اكتشاف حياة في الفضاء قياس التركيب الوراثي. فعلى سبيل المثال، صُمّمت مسابير ناسا «فايكنغ لاندر» (Viking Lander)، التي بحثت عن الحياة على كوكب المريخ في السبعينيات، للتعرّف على عملية الأيض الشبيهة بالأيض على كوكبنا الأرضي، لدى الميكروبات الموجودة في تربة المريخ (الفصل السادس).

أشارت الفيلسوفة كارول كليلاند (Carol Cleland) والعالم كريستوفر شيبا (Christopher Chyba) إلى أن محاولات تعريف الحياة أشبه بمحاولات علماء القرن السابع عشر تعريف الماء. فقد كان الماء آنذاك يُعرف بأنه سائل عديم اللون والرائحة يغلي ويتجمد عند درجات حرارة معيّنة. ومن دون النظرية الذرية، لم يكن أحد ليعرف أن الماء عبارة عن مجموعة من الجزيئات، كل منها يتكون من ذرتي هيدروجين مرتبطتين بذرة أكسجين. وقياساً على ذلك، ربما نفتقر إلى نظرية الأنظمة الحيّة اللازمة لتعريف الحياة.

يتلخّص كثير من المشكلات التي تواجه تعريف الحياة في أنه لا يوجد لدينا سوى مثال واحد، وهو الحياة على الأرض. وتستخدم جميع الكائنات الحية الموجودة على الأرض الأحماض النووية فيما يخصّ المعلومات الوراثية، والبروتينات للتحكّم في معدلات التفاعل الكيميائي الحيوي، وجزيئات متطابقة تحتوي على الفُسفور لتخزين الطاقة. وهذه الكيمياء الحيوية الأساسية متطابقة سواء في البكتيريا أم الحوت الأزرق. لذا يصعب علينا أن نحدّد أيَّ خصائص الحياة على الأرض فريد من نوعه وأيّها ضروري بشكل عام لتأهُّلها للتصنيف بمثابة «حياة». ويمكن لعلم الأحياء الفلكية مساعدتنا على حل هذا اللغز إذا عثرنا على حياة خارج الأرض.

ضرورات الحياة المجّردة

على الرغم من عدم وجود تعريف محْكَم للحياة، فإن هناك مبرّرات معقولة للاعتقاد بأن في الكيمياء الحيوية الأرضية ذرّات معيّنة شائعة من المرجح أنها مستخدمة في الكائنات الحية الخارجية وقد تساعدنا في التعرّف على الحياة في أماكن أخرى. فعلى الأرض، يمثّل الكربون والنيتروجين والهيدروجين العناصر البنيوية الرئيسة في علم الأحياء، بينما تحدث التفاعلات الكيميائية في الماء السائل. أما في علم الأحياء الفلكية، فهناك اتفاق واسع على أن الحياة في أماكن أخرى من المحتمل أن تكون قائمة على الكربون، وأن أيَّ كوكب يحتوي على مياه سائلة سيكون مناسباً، على الأقل، لوجود «الحياة كما نعرفها». وتأتي هذه الاستنتاجات من إدراك أن الحياة مبنية من مجموعة أدوات محدودة، أي الجدول الدوري للعناصر الكيميائية، المتطابقة في جميع أنحاء الكون.

والواقع أن الكربون هو العنصر الوحيد القادر على تكوين مُركَّبات طويلة مؤلّفة من مليارات الذرات مثل الحمض النووي الريبي المنقوص الأكسجين. ومن ثمّ فإن الحياة الخارجية القائمة على الكربون هي وحدها القادرة على امتلاك جينوم ذي بنية معقّدة مماثلة لجينوم الحياة الأرضية. ويتسم الكربون أيضاً بمجموعة متنوّعة من الخصائص الأخرى التي تسمح لمُركّباته بامتلاك كيمياء فريدة من نوعها، وهي كافية لينبثق عنها علم الكيمياء العضوية. وتشمل خصائص الكربون المميَّزة قدرته على تكوين روابط أحادية وثنائية وثلاثية مع نفسه ومع كثير من العناصر الأخرى أيضاً. ويستطيع الكربون أيضاً بناء أشكال معقّدة ثلاثية الأبعاد بتشكيل حلقات سداسية تتلاحم مع بعضها بعضاً.

نظراً لأن الحياة يجب أن تبدأ وتنتشر، فالأرجح أن تكون الذرات الرئيسة التي تتألف منها الحياة موجودة بوفرة. ويحتل الكربون المركز الرابع، بعد الهيدروجين والهيليوم والأكسجين، في الوفرة في الكون. وقد تبيّن لعلماء الفلك أن كثيراً من الجزيئات العضوية غير البيولوجية موجودة بالفعل في الفضاء. وقد تكون هذه الأشياء المجانية بمنزلة بوادر لبدء الحياة (انظر الفصل الثالث). على سبيل المثال، إن ما يقارب 30 في المئة من كتلة الغبار بين النجوم هو مواد عضوية. وتحتوي ما تُسمى أحجار الكوندريت الكربوني النيزكية على كربون عضوي بنسبة تصل إلى 2 في المئة، وتحتوي جزيئات الغبار بين الكواكب في مجموعتنا الشمسية على كربون عضوي بنسبة تصل إلى 35 في المئة، حسب الكتلة.

ونظراً لأن السيليكون يتميّز بخصائص كيميائية تشبه الكربون، يؤكَّد أحياناً أن السيليكون قد يسمح بوجود كيمياء حيوية خارجية بديلة للجزيئات القائمة على الكربون، على الرغم من كون السيليكون أقل وفرة من الكربون بنحو عشر مرات في الكون. لكن في الماء، على الأقل، عادة ما تكون مُركَّبات السيليكون غير مستقرّة، ويمكن أن يتحوّل السيليكون بسهولة إلى أكاسيد سيليكون صلبة. فثاني أكسيد الكربون غاز متوافر في درجات الحرارة الكوكبية الشائعة، ويذوب في الماء بتركيزات كافية لكي تستخدم الكائنات الحية ثاني أكسيد الكربون مصدراً للكربون. بالمقابل، نجد أن ثاني أكسيد السيليكون مادة صلبة غير قابلة للذوبان، مثل الكوارتز. وروابط السيليكون-الأكسجين-الهيدروجين قوية، أما روابط الكربون-الأكسجين، والكربون-الهيدروجين، فهي مماثلة في القوة لرابطة الكربون-الكربون، ما يسمح للمُركّبات القائمة على الكربون بالخضوع لتفاعلات

التبادل والتعديل. وتميل روابط السيليكون-الهيدروجين أيضاً إلى التحلّل بسهولة في الماء. ويتطلّب استقرار الجزيئات القائمة على السيليكون درجات حرارة منخفضة لإبطاء التفاعلات التي ستدمّرها لولا ذلك. وتشمل المذيبات الباردة برودة مناسبة محيطات النيتروجين السائل على الكواكب الجليدية البعيدة جدّاً عن نجومها. وما زالت هذه الحياة القائمة على السيليكون محض تكهّنات حتى وقتنا الراهن.

ولكن لا بد من وجود وسط مستقر لتحدُث عمليات كيميائية حيوية مثل الأيض أو الاستنساخ الوراثي؛ وهذا الوسط المستقرّ هو الماء السائل على كوكب الأرض. أما للحياة الخارجية، فيمكن أن يكون الوسط سائلاً آخر غير الماء أو غازاً كثيفاً، ما دام أنه لا يتحوّل بسهولة إلى مادة صلبة في البيئة السائدة. ومع ذلك، فإن الماء (H_2O) يتميّز ببعض الخصائص الفريدة. فخلافاً لتوأمه الكريه الرائحة، ألا وهو كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، الذي يتكثّف متحولاً إلى سائل كريه في درجة حرارة -61 مئوية، يتحوّل الماء إلى سائل في درجة حرارة دون 100 درجة مئوية في ظروف الضغط العادية. ويحدث استقرار الماء السائل لأن ذرة الأكسجين في جزيئات الماء ذات شحنة سالبة قليلاً وتسمح بتكوُّن «رابطة هيدروجينية» قوية نسبياً مع ذرات الهيدروجين المشحونة بشحنة جزئية موجبة لجزيئات الماء الأخرى. ويوفّر الكبريت روابط هيدروجينية أضعف بين جزيئات كبريتيد الهيدروجين. ويشكِّل الماء أيضاً مع جزيئات الماء الأخرى روابط هيدروجينية أقوى من روابطه مع جزيئات المواد الزيتية. ونتيجة لذلك تنفصل الزيوت عن الماء، ما يسمح لأغشية الخلايا بالتشكُّل وتوفير مآوٍ للجينات وعمليات الأيض.

هناك خاصية أخرى غير عادية يتميّز بها الماء، وهي أن الثلج أقل كثافة من الماء السائل. فعندما يتجمّد الماء، تصطف الجزيئات في بِنًى شبيهة بالحلقة تحتوي على ثقوب مفتوحة بالمقياس الذرّي. ولو كان الثلج أشدّ كثافة من السائل، لتجمّعت الثلوج في قيعان البحيرات والبحار الباردة، ولكانت هذه الثلوج معزولة وظلّت متجمّدة. كانت البحار ستتجمّد من القاع لأعلى وتصبح غير صالحة للسكنى. وكان هذا سيحدث لأن ضوء الشمس سينعكس مرتدّاً في المناطق التي وصل فيها الثلج إلى السطح، ما يتسبّب في التبريد وزيادة تراكم الثلج. وقد يكون التجمّد التدريجي هو المصير المؤسف لبحار السوائل الأخرى، مثل الأمونيا. فمُركّب الأمونيا يكون على هيئة سائلة في درجة حرارة من -78 مئوية تقريباً إلى -33 مئوية تقريباً عند ضغط يبلغ جوّاً واحداً. لكن أيَّ بحار من الأمونيا ستميل إلى التجمّد من القاع لأعلى، على عكس بحار الماء التي تظل سائلة حتى إذا تسبّبت برودة درجات الحرارة في تكوّن غطاء جليدي.

على الأرض، توجد الميكروبات أينما وُجد الماء السائل (باستثناء الأجهزة المعقّمة)، لذا فإن «الحياة كما نعرفها» قائمة على «الماء» بقدر ما هي قائمة على «الكربون». وبالتالي فإن اكتشاف وجود ماء سائل أو آثار وجوده في المجموعة الشمسية، يُعدُّ هدفاً للمسابير الكوكبية، كالتي يتم إرسالها إلى المريخ. ومع ذلك، يمكن تصوُّر المذيبات العضوية بدائل للماء، وهو أمر يحتمل أن يكون مهمّاً بالنسبة لقمر «تيتان»، أكبر أقمار زحل (الفصل السادس).

ثمة ملاحظة أخرى مستمدة من الحياة الأرضية، وهي أن ستة عناصر لافلزية فقط - الكربون (C) والهيدروجين (H) والنيتروجين (N) والأكسجين (O) والفُسفور (P) والكبريت (S) - تُشكِّل ما يصل إلى 99 في المئة من المادة الحية حسب الكتلة. وغالباً ما يُشار إلى هذه العناصر بالاختصار CHNOPS، لكنني أفضِّل SPONCH، لأنه أسهل نطقاً. فنجد الهيدروجين والأكسجين في الماء الذي يُشكِّل معظم الأنسجة الحية، والكربون والهيدروجين والأكسجين في الأحماض النووية للمادة الوراثية وفي الكربوهيدرات. ويوجد الكربون والهيدروجين والنيتروجين والكبريت في البروتينات، أما الفُسفور فهو ضروري للأحماض النووية وجزيئات تخزين الطاقة. ومن ثمّ فإن اكتشاف العناصر الستة SPONCH في الصور الكيميائية التي يمكن أن تستخدمها الحياة هدف عملي آخر للمسابير الفضائية الكوكبية التي تبحث عن حياة شبيهة بالحياة الأرضية.

أهمية وجود حياة في أماكن أخرى

قد تتساءل عمَّا إذا كان يهمنا حقاً أن نكتشف كائنات فضائية بسيطة تشبه الميكروبات. والجواب هو أننا لو استطعنا العثور على مثالٍ واحدٍ على حياة نشأت في مكان آخر، فسيبرهن ذلك على أن الحياة ليست معجزة محصورة في الأرض. ولن نكون بمفردنا. وحتى أبسط الميكروبات الموجودة في المريخ أو في محيطات يوروبا ستغيِّر مقاييس احتمال وجود حياة في أماكن أخرى في المجرّة، لأنها ستبرهن على أن الحياة يمكن أن تنشأ مرتين داخل مجموعة شمسية واحدة. وليس لدينا في الوقت الراهن أيُّ أدلة مقنعة على وجود حياة خارج الأرض. لكني سأحتجّ في الفصل السادس بأن هناك تسعة أجرام أخرى على الأقل في مجموعتنا الشمسية ربما تكون صالحة للسُكنى اليوم، هذا إذا اتسع صدرنا لقبول الرأي الآخر. فعلم الأحياء الفلكية في المجموعة الشمسية بعيد كل البعد عن السلامة من الشك.

ثمة عامل ثانٍ مهم في عملية العثور على حياة يعود إلى صعوبات تعريف الحياة. فقد علّق عالم الكواكب كارل ساغان (Carl Sagan، 1934-1996) في كتابه «الصلة الكونية» (*Cosmic Connection*) (1973) بقوله إن «العلم الذي سيحقق أكبر مكسب بفارق كبير من وراء استكشاف الكواكب هو علم الأحياء». وسيكون تمحيص الحياة الخارجية ذا أهمية شديدة ليس في الوقوف على تلك الخصائص الصعبة التحديد المشتركة بين جميع أشكال الحياة فقط، وإنما أيضاً في تسليط الضوء على كيفية نشأة الحياة، وهذا سؤال ما فتئ يفتقر إلى جواب.

الفصل الثاني من الغبار الكونيّ إلى الكواكب... أماكن للحياة

الفصل الثاني
من الغبار الكونيّ إلى الكواكب...
أماكن للحياة

إذا أردت أن تصنع فطيرة تفاح من الصفر، فعليك أولاً أن تخترع الكون.

كارل ساغان (1980)

عندما بدأ الكون، كانت درجات الحرارة في كل مكان مرتفعة جداً، لدرجة أن الذرّات لا يمكن أن تكون في حالة استقرار، ناهيك عن أن تندمج معاً لتكوِّن جُسيمات بيولوجية معقدة التركيب. والحياة موجودة لأنه بعد «انفجار عظيم» وقع قبل 13.8 مليار سنة، تَوسَّعَ كونٌ ساخنٌ كثيف ثمّ برد. وبينما توسَّع وبرد، نشأت الذرّات والمجرّات والنجومِ والكواكب. ننظر في هذا الفصل بعين الدارس الفاحص في الكيفية التي أنتجت بها هذه العملية موئلاً للحياة... وأعني الأرض.

ونبدأ ببنية الكون الحالي التي تُقدِّم لنا دلائل على تاريخه. تخيَّل عزيزي القارئ رحلةً تنتقل بك إلى أطراف الكون المنظور. بسرعة الضوء البالغة 300 ألف كم/س، سيستغرق الأمر 1.3 ثانية فقط لنصل إلى القمر الواقع على بُعد 384 ألف كم من الأرض. يُظهِر رسم إيضاحي الأرض على هيئة بقعة قطرها 2.7 ملم ومعها القمر، على النحو التالي:

القمـــر الأرض

من السهل إلى حد كبير استيعاب هذا المقياس، لكن خيالنا يصطدم بتحدٍ إذ ندرك إن الشمس لو وُضِعَت على المقياس ذاته لبلغ قطرها 30 سم، ولتعيَّن علينا حينئذ أن نضعها على بُعد 30 متراً

من هذا الكتاب. أما نجم قنطور الأقرب (Proxima Centauri)، الصغير مقارنةً بالشمس، فسيبلغ قُطْره 4 سم. وللحفاظ على هذا المقياس، سيتعين علينا أن نضعه على بُعد 8650 كم، أي ما يوازي الرحلة التي تقطعها الطائرة ما بين مدينتي سان فرانسيسكو ولندن.

ولو تابعنا رحلتنا بسرعة الضوء، لاستغرق الأمر 8.3 دقائق لننطلق من الأرض حتى الشمس، وأربعَ ساعات إضافية إلا قليلاً لنصل إلى متوسّط المسافة المدارية لكوكب نبتون، وهو الحدُّ الأقصى للكواكب الثمانية. وبعد 4.2 سنة، سنصل إلى نجم قنطور الأقرب. وفي ظل المسافة المهولة التي نتحدّث عنها، فإننا نُحدِّد المسافة التي يقطعها الضوء في عام واحد، وتُقدَّر بـ 9500 مليار كيلومتر، بالسنة الضوئية، ومن ثمّ فإن نجم قنطور الأقرب يبعد عنا مسافة 4.2 سنة ضوئية.

والشمس وقنطور الأقرب نجمان من بين 300 مليار نجم في مجرّة درب التبانة التي تتخذ شكل قرص يبلغ عرضه 100 ألف سنة ضوئية، وتتركّز النجوم في أذرعه الحلزونية. وتحوي المجرّات ملايين التريليونات من النجوم، ومن ثمّ فإن مجرة درب التبانة كبيرة نسبياً. وتقع المجموعة الشمسية داخل ذراع الجبار (Orion Arm)، على بُعد ثُلثي المسافة من مركز المجرّة. وتبدو هذه الذراع عاديّةً مقارنةً ببعض الأذرع الأخرى الأكثر ثراءً بالنجوم. لكن ربما كان موقع المجموعة الشمسية في الأطراف المِجَرِّيَّة في حقيقة الأمر محورياً للحياة على الأرض. ولعل الأرض تجنّبت كوارث بعينها، مثل قربها من النجوم المُتفجرة. وإن صح ذلك، فربما كانت هناك منطقة محدّدة في المجرّات مناسبة للحياة، تُعْرَف باسم «المنطقة المِجَرِّيَّة الصالحة للسُكنى»، سنتناولها بالنقاش في الفصل السابع.

وعلى مقياس أكبر، هناك ما يربو على 100 مليار مجرّة في الكون المنظور مُرتَّبَة ضمن مجموعات وعناقيد مجرِّيَّة. وفي نطاق قُطْرٍ يبلغ نحو 10 ملايين سنة ضوئية مركزه ما بين مجرّة درب التبانة وأقرب مجرّة حلزونية لنا، وتُعرف باسم مجرة المرأة المسلسلة (Andromeda) وتبعُد نحو 2.5 مليون سنة ضوئية، هناك 50 مجرة تقريباً تُشكِّل «مجموعة محلية». وتُعدُّ هذه المجموعة بدورها واحدة من نحو مئات المجموعات الموجودة داخل فَلَك قُطره 110 ملايين سنة ضوئية، تُشكِّل ما يُعرف باسم عنقود مجرّات العذراء العظيم (Virgo Supercluster). وتُظْهِر الخرائط التي تغطي مليارات السنين الضوئية خيوطاً من نقاط دقيقة متفرّقة، تمثّل كل نقطة من تلك النقاط مجرة بحدِ ذاتها. وفي أبعاد ثلاثية، تندمج الخيوط المِجَرِّيَّة، وهي أكبر بِنى معروفة للبشر، على هيئة شبكة تفصلها فراغات شاسعة. ويبدو البناء البديع كله وكأنه نُسِج بأرْجُل عنكبوت عابرة للمجرّات.

ما حجم الكون المنظور؟ لو لم يتمدَّد الفضاء، لكانت أبعد مسافة يصل إليها الكون 13.8 مليار سنة ضوئية، وهي المسافة التي يقطعها الفوتون - جُسيم ضوئي - من لحظة وقوع الانفجار العظيم منذ 13.8 مليار سنة. لكن الفضاء تمدَّد بالفعل؛ ومن ثم فإن الحجم الفعلي للكون المنظور يُقدَّر الآن عَرْضَه بنحو 47 مليار سنة ضوئية. وهذا التمدُّد الشاسع محلٌّ اعتبارٍ في علم الأحياء الفلكيّ لأن التقديرات المساحيَّة للكواكب التي تدور حول النجوم في محيط مجرة درب التبانة فقط توحي بأن كل نجم يستضيف على الأقل كوكباً واحداً في المتوسّط. وجزء من الكواكب ينبغي أن يكون صالحاً

للسُكنى، ربما 1% منها على الأقل، ومن ثمّ فإن عدد الأماكن المحتملة للحياة ربما تجاوز تريليون مليار.

ترجع بنية الكون إلى الانفجار العظيم. ولقد أثبتت الأرصاد المقرابية للفلكيّ الأمريكي إدوين هابل (Edwin Hubble) في عشرينيات القرن العشرين أنّ المجرّات تتحرك بعيداً عن بعضها بعضاًعلى نطاق واسع بينما يتسع الفضاء بينها. ومن ثمَّ لو عُدنا بالزمن إلى الوراء، فلا بد أننا سنكتشف أن جميع محتويات الكون كانت منضغطةً معاً وشديدة السخونة. هذا التصوّر أدى إلى استنباط الدليل القوي على وقوع الانفجار العظيم. وإن توهّجه اللاحق، ويُعرف باسم إشعاع الخلفية الكونية الميكرويّ، منتشر في الكون بأسره. وإن صَحَّت فكرة الانفجار العظيم، فإن الفيزياء تقتضي أنه قبل برودة درجة حرارة الكون الأول، لا بدّ أنه كانت هناك كرة نارية مُعتمة قوامها الإلكترونات والبروتونات (الجُسيمات المشحونة بشحنات كهربية سالبة وموجبة التي تشكل قوام الذرّات) والفوتونات (جُسيمات الضوء) وبعض المجموعات الصغيرة من البروتونات المُندمجة. وبعد نحو 380 ألف سنة من الانفجار العظيم، أمست تلك الكرة باردة بالقدر الذي مكّن الإلكترونات من الاندماج في البروتونات، أو مجموعات البروتونات، لتُشكِّل أصغر ذرتين على الإطلاق، ألا وهما الهيدروجين والهيليوم. وفي تلك المرحلة، بَاتَ الكون شفَّافاً للضوء لأن الفوتونات في السابق كانت مُبعثرة بفعل الإلكترونات الحرة.

كان هذا الموقف السابق مماثلاً للطريقة التي يرتَّدُ بها الضوء مبتعداً عن القُطيرات الصغيرة في الضباب فتتعذّر عليك الرؤية. ومنذ أن فَقَدَ الكون عتامته، تمدَّد بمقدار 1000 ضِعْف، والطول الموجيّ للفوتونات الباقية من الانفجار العظيم تمدَّد بالكَّم ذاته، فتغيرت الفوتونات من الضوء الأحمر إلى الموجات المتناهية الصغر (الميكرويَّة). ومن المدهش أنه عندما تَضْبط تردُّدَ تلفزيون أو مذياع تناظريّ قديم بين قناتين، فإن الإشعاع المتبقي من الانفجار العظيم يسهم في حدوث الهسيس الثابت، لكن ذلك يحدث على مستوى 1% أو أقل تقريباً. وحقيقة الأمر أنه في عام 1964، كان هذا الضجيج الصادر من مكبّر صوت بوقيّ ضخم لمذياعٍ هو الطريقة التي اكتُشف بها إشعاع الخلفية الميكرويّ. لقد وقع اللوم في بداية الأمر على فضلاتٍ الحمائم التي سقطت داخل البوق، ولكن بعد تنظيف البوق وإطلاق النار على الحمائم ذات الحظ العاثر، عُرِفَ أن السبب الحقيقي هو بداية الكون.

لقد ظهرت المجرّات بعد بضع مئات ملايين السنين من الانفجار العظيم. وبعض أماكن الكون احتوت على مادة أكثر كثافة من المتوسّط بنسبة ضئيلة جداً، ومن ثمّ تمتعت بقوة جاذبية كبرى. وأَنْتَجَ التكتّل المجرات، وبداخل المجرّات، على نطاق أصغر، تداعت السُّحُب الغازية تحت وطأة جاذبيتها الذاتية. وارتفعت درجة حرارة الجزء الداخلي لكل سحابة مُنكمشة أثناء تصادم جُسيمات الغاز، حتى خلقت في نهاية المطاف كرةً ساخنة ملتهبة من الغازات... ألا وهي النجم.

إن جزءاً من البادئة «astro-» في كلمة «astrobiology» مُستخلص من حقيقة أن جميعها التي استغلتها أشكال الحياة، خلا الهيدروجين، انبثقت من داخل النجوم. وكانت النجوم الأولى تتكوّن من العناصر التي تجمّعت في الانفجار العظيم وحسب؛ ألا وهي الهيدروجين الذي يُشكِّل ثلاثة أرباع الكتلة، والهيليوم الذي يشكل بقية الكتلة عدا اليسير من الليثيوم. ولم يكن الأكسجين الموجود داخل

الماء ولا النيتروجين الموجود في البروتينات ولا الكربون الداخل في كل جزيء عضوي موجوداً في البداية. لكن النجوم في نهاية المطاف صنعت تلك العناصر.

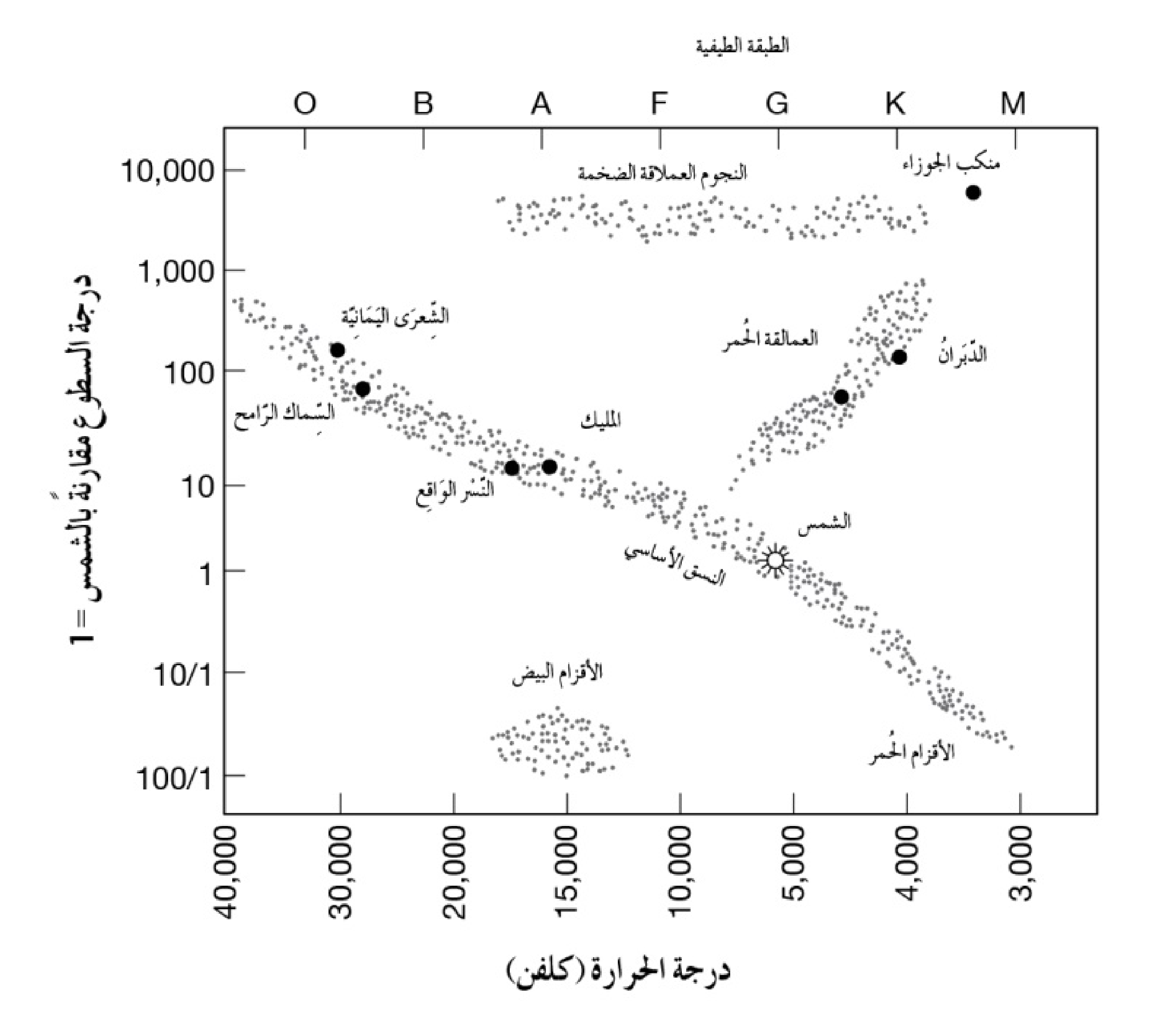
لكي نفهم كيف تصنع النجومُ هذه العناصر، علينا أن ننظر إلى النحو الذي تسطع به الشمس. إن الحرارة الشديدة داخل الشمس تُفَكِّك كل ذرةٍ إلى مكوّناتها الأصلية: نواة موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة. والحرارة في مركز الشمس - وتبلغ نحو 16 مليون درجة مئوية - كافية لدمج نوى أربع ذرات هيدروجين في نواة هيليوم واحدة، وهو تفاعل نووي ينتج الفوتونات. وينطلق كل فوتون بعد ذلك في رحلة مُدتها مليون سنة من داخل الشمس إلى الفضاء. وتستغرق الرحلة فترة طويلة جداً لأن كل فوتون يُمتص وينبعث باستمرار كلما صادف مادةً في طريقه. ويفقد الفوتون طاقةً أيضاً، إذ يبدأ رحلته على هيئة أشعة جاما عالية الطاقة، ويتحول غالباً إلى فوتون منخفض الطاقة من الضوء المنظور بحلول الوقت الذي يُفلِت فيه من الشمس. في خمسينيات القرن العشرين، أعاد الفيزيائيون إنتاج التفاعلات النووية التي تحْدُث داخل الشمس بالقنابل الهيدروجينية. فألباب النجوم المماثلة للشمس أشبه بالقنابل الهيدروجينية التي لا تستطيع في حقيقة الأمر أن تنفجر نظراً لكونها حبيسة المادة الثقيلة الوزن التي تعلوها.

إن الشمس لن تدمج الهيدروجين في لبِّها إلى الأبد، وستدمِّر تداعيات ذلك الحياة على الأرض (وهو ما يجيب عن جزء من السؤال الذي يطرحه علم الأحياء الفلكية «ما مستقبل الحياة؟»). في غالبية الألباب النجميَّة، يؤدي تراكم «رماد» الهيليوم إلى تراجع درجات الحرارة وانخفاضها بشدّة وبدرجة تتعذّر معها استدامة اندماج الهيدروجين. وفي هذه المرحلة، ينكمش النجم تحت وطأة وزنه، ما يؤدّي إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى الحدِّ الذي يطلق شرارة الاندماج الهيدروجيني في قشرةٍ تحيط باللب. ويؤدي انبعاث الطاقة إلى توسُّع الطبقات الخارجية للنجم وبرودتها واحمرارها. هكذا يتشكل «عملاق أحمر»، مثل نجم الدَّبَران، وهو أكثر النجوم لمعاناً في كوكبة الثور. وستمسي الشمس في نهاية المطاف عملاقاً أحمر، وستتضخم مئتي مرة بعد 7.5 مليار سنة، حتى إنها ستبتلع الأرض على الأرجح. إن وزن رماد الهيليوم الإضافي يمارس في النهاية ضغوطاً على لبّ العملاق الأحمر حتى تصل حرارته إلى ما بين 100 و200 مليون درجة مئوية، أي ما يكفي لدمج نوى الهيليوم وصنع الهيدروجين والكربون. والقشرة المشتعلة بالهيليوم بدورها يمكن في نهاية المطاف أن تحيط بلُبٍ قوامه الكربون و«رماد» الأكسجين. وينتهي الأمر بالنجوم التي يبلغ حجم كتلتها ضِعف حجم كتلة الشمس ثماني مرات بدمج الكربون والهيدروجين في عناصر أكثر ثقلاً، بما في ذلك النيون والمغنيسيوم.

بشكل عام، تنطوي سَكَرَات موت نجم مثل الشمس على طَرْح الطبقات الخارجية في الفضاء. وتُدعى هذه الطبقات الغازية المتوهّجة «السديم الكوكبي» لأنها تشبه نوعاً ما الكواكب عند النظر إليها عبر مقارب التكبير المحدود، لكنها لا تَمُتُّ بصلةٍ للكواكب. ويبرد الجزء المتبقي من النجم ويتحوّل إلى «قزم أبيض» يضارع قُطره قطر الأرض، لكنه يتسم بكثافة مهولة. من الناحية النظرية، يَكُفُّ القزم الأبيض عن السطوع بعد عشرات إلى مئات مليارات السنين، فينتج قزماً أسود. لكن الكون ليس قديماً إلى هذا الحد بعدُ.

تنفجر النجوم الكبرى التي تزيد كتلتها على كتلة الشمس بنحو ثماني مرات في نهاية المطاف على هيئة مُستعرات عُظمى. والشمس أمست في منتصف الطريق إلى مرحلة عشرة مليارات سنة من الاندماج الهيدروجيني في لُبِّها، لكن هذه النجوم العملاقة تظل في تلك المرحلة ذاتها لمدة تقل عن 60 مليار سنة قبل أن تتحوّل إلى عمالقة حمراء ضخمة، ومثال عليها نجم منكب الجوزاء (Betelgeuse) الواقع في كوكبة الجبَّار. وفي مثل هذه النجوم، ينتِج الاندماج النووي داخل الطبقات المحيطة باللبّ عناصرَ النيون والمغنيسيوم والسيليكون والحديد. والحديد عموماً أثقل العناصر الناتجة، لكن بعض العناصر الأثقل وزناً تُنتج أيضاً عندما تُضاف النيوترونات الحرة إلى النوى الحالية. (والنيوترونات جُسيمات عديمة الشحنة الكهربائية، وتوجد عادةً في النوى الذرية). وعندما ينفد الوقود داخل تلك النجوم، ينضغط لبّها بشدة لدرجة أن الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة تتحدّ مع البروتونات المشحونة بشحنة موجبة لنوى الحديد. وتتعادل الشحنات الكهربائية، فتنتج جُسيمات النيوترونات غير المشحونة. ونتيجة لذلك، يتقلص قُطر اللُّب النجميّ إلى نحو 12 كيلومتراً، ليُشكِّل شيئاً أشبه بنواة ذرية عملاقة مصنوعة فقط من النيوترونات. وبسبب الانكماش، تنهار البقية الباقية من النجم على اللُّب النيوترونيّ الكثيف، ويخلق ارتدادٌ عنيف المُستعر الأعظم اللامع بشكل مذهل.

وتُنتج المستعرات العظمى عناصر أثقل من الحديد وتُوزِّعها. وبعد ثوانٍ معدودة من انفجار المُستعر الأعظم، ترتفع حرارة الطبقات الخارجية للنجوم بشدة حتى تصل إلى 10 مليارات درجة مئوية بينما يوفِّر انفصال النوى من الطبقات الأعمق نيوترونات كثيرة لتأجيج التفاعلات التي تصنع العناصر الثقيلة. وتخلق هذه العمليات الكيميائية الكونية العناصر الثقيلة النفيسة، مثل الذهب والفضة والبلاتين. والمهم أن المادة التي تنطلق من المُستعر الأعظم تُشكل أساساً للأجيال الجديدة من النجوم وأماكن الحياة التي هي كواكبها. وفي حالة النجوم التي تضارع كتلتها النجميَّة كتلة عشرات النجوم، رغم أنها تتحوّل إلى مستعرات عظمى، فإن الانهيار الذي يحدث في المركز يؤدي إلى ثقب أسود؛ وهو جرم عظيم



1. مخطط هرتزشبرونغ-راسل للشمس والنجوم القريبة منها. ودرجات الحرارة مُقدرة بوحدة الكلفن، وهي 273 + درجة الحرارة المئوية. ومقياس كلفن مُحدد بدقة بحيث إن درجة الحرارة صِفر كلفن أو «الصفر المطلق» هي التي تتوقف عندها جميع التحرّكات الجزيئية.

الكتلة لدرجة أن شيئاً لا يفلت من جاذبيته، بما في ذلك الضوء ذاته.

والمرحلة التي يُحوِّل فيها النجم الهيدروجين إلى هيليوم في لُبِّه هي عُمر النسق الأساسي، وهي عادةً الفترة الفاصلة التي يمكن أن نَعدَّها مثالية لازدهار الحياة على الكواكب المحيطة بالنجم. ويشير

«النسق الأساسي» إلى الشريط المائل من أعلى اليسار إلى أدنى اليمين، على أشهر مخطط بياني في علم الفلك بأسره؛ ألا وهو مخطط هرتزشبرونغ-راسل (Hertzsprung-Russell) (الشكل 1)، الذي سُمِّي تيّمناً باسمَيْ من وضعاه. ويوضح المخطّط البياني درجة سطوع النجم مقارنةً بدرجة حرارة سطحه. ولا يعني علماء الفلك بكلمة «سطحه» السطحَ الجامدَ للنجم، وإنما المستوى الذي يُصْدِر أعلى درجة سطوع في الغلاف الجوي للنجم، وهو أعمق مكان يمكننا رؤيته.

ومن الغريب أن محور درجة الحرارة يمتد عكسياً من العالية إلى المنخفضة في مخطط هرتزشبرونغ-راسل، والغرض مضاهاة الترميز اللوني للنجوم من النجوم الساخنة الزرقاء المائلة للبياض إلى النجوم الحمراء الأكثر برودة بالأحرف O وB وA وF وG وK وM. ويحدِّد كل حرف «الرتبة الطيفيَّة» للنجم. ويستظهر طُلاب علم الفلك الأنواع الطيفيَّة بعبارة «Oh Be A Fine Girl/Guy Kiss Me!» (والأحرف لا تمثِّل أيَّ شيء، وتضرب بجذورها في علم الفلك إبان القرن التاسع عشر، وهو أمر لا يعنينا).

تقع أضخم النجوم حجماً أعلى اليسار على النسق الأساسي، بينما تقع أصغرها وأخفها وزناً أدنى اليمين. ويُعرف النجم المنتمي إلى النسق الأساسي، مهما كانت كتلته، باسم القزم، كالشمس على سبيل المثال، وهي قزم من النوع G. ويمكن أن يكون عُمر النجم على النسق الأساسي أكثر من 50 مليار سنة للأقزام الحمراء الباردة.

إن الطريقة التي «تحيا» بها النجوم «وتفنى» لها أهمية بالغة في علم الأحياء الفلكية. فشمسنا أحد نجوم النسق الأساسي التي انتصف بها العُمر، إذ تشع أشعة منتظمة تَمُدُّ غالبية أشكال الحياة على الأرض بالطاقة عبر عملية التخليق الضوئي. وكما ذكرنا في البداية، تَخَلَّقت ذرات الحياة داخل النجوم العملاقة الحمراء والنجوم العملاقة الضخمة. والأكسجين والسيليكون والمغنيسيوم والحديد أيضاً صُنِعت من أعداد صحيحة من نوى الهيليوم، ومن ثمّ فهي منتجات متاحة بوفرة خصيصاً للاندماج النووي، وهو الأمر البالغ الأهمية لأن هذه الذرات هي التي تصنع الصخور. فالكواكب الصخرية، مثل الكوكب الذي نعيش فيه، نتاج طبيعي لفيزياء ضوء النجوم. ونعلم أيضاً أن الشمس نجم من الجيل الثاني على الأقل، لأن لدينا عناصر المستعر الأعظم على الأرض، مثل الذهب. لكن بما أن عُمر الشمس يُقدَّر بـ 4.6 مليار سنة فقط لا غير في مجرّة درب التبانة البالغ عمرها 13.2 مليار سنة، فهذا يعني أن كثيراً من النجوم نشأت وتلاشت قبل أن تنشأ الحياة على الأرض. هل دَعمَت النجوم السابقة الكواكب والحياة، أو حتى الحياة الذكية؟ وما الذي حَلَّ بها؟ يقودنا ذلك إلى السؤال المتعلق بكيفية نشأة كوكبنا.

الحصول على مكان للحياة: منشأ الكواكب

للأفكار المعنية بنشأة المجموعة الشمسية تاريخ طويل. ففي عام 1755، اقترح إيمانويل كانط أنّ المجموعة الشمسية تكوَّنَت من رحم سحابة مُشتتة في الفضاء. ولاحقاً في عام 1796، فسَّرَ العالم الرياضيّ بيير سيمون ماركيز دو لابلاس (Pierre Simon, the Marquis de Laplace)

الفكرة وبيَّنها. ويُعرف مفهوم كانط-لابلاس الأساسي باسم «فرضية السديم» (nebular hypothesis)، نسبةً إلى كلمة «nebula» الإغريقية التي تعني «السحاب».

وتنطلق الفرضية من فكرة أن جزءاً ما من السديم أكثر كثافةً نوعاً ما من الأجزاء الأخرى، ويستقطب المادّة نحوه بفعل الجاذبية. ومن المرجح أيضاً أن السديم يتمتّع بدوران مبدئي طفيف، بحيث يدور السديم المُنكمش بسرعة كبرى، كمتزلج على الجليد يضم ذراعيه إلى جسده. وستعترض الحركة العشوائية للغاز والغبار المادّة المُنجذبة على طول محور الدوران، لكن المادة المُتقاربة في مستوى الدوران ستواجه مقاومة من الدوران. ونتيجة لذلك، يتسطَّح السديم ويتخذ شكل قرص. تتشكل الشمس في مركزه، بينما تتجمّع الكواكب في مستوى القرص من مادة متناثرة. ويتسق ذلك مع كتلة الكواكب التي لا تتعدى 0.1% من كتلة الشمس. ولأن الكواكب تتكوّن من قُرص سديمي، فإنها تكون جميعها في المستوى ذاته، وستدور كلها في مدار الشمس في الاتجاه عينه، كما لاحظنا.

في العقود الأخيرة، شَاعَ الظن بأن الدليل المُستخلص من النظائر يوحي بأن موجة صَدميَّة ناشئة من مستعر أعظم قريب تسبّبت في انهيار السديم. والنظائر ذرات تحوي العدد ذاته من البروتونات في نواتها، لكنها تحوي عدداً مختلفاً من النيوترونات. ويعني الأصل الإغريقي لكلمة «(isotope «isos topos) «المكان المساوي»، ما يشير إلى الموقع ذاته في الجدول الدوريّ للعناصر. وأحياناً يحوي النظير نواةً أكبر بكثير من أن تكون مُستقرة، فتتفكّك بفعل الاضمحلال الإشعاعيّ. فذرة الألمنيوم-26 (التي تحوي نواة ذات 26 جُسيماً = 13 بروتوناً + 13 نيوتروناً) تضمحل وتتحوّل إلى ذرة مغنيسيوم-26 مستقرّة (التي تحوي 12 بروتوناً + 14 نيوتروناً). وفي أيِّ عينة من ذرات الألمنيوم-26، يُقدَّر الوقت الذي يستغرقه نصف عددها كي تتحوّل إلى ذرات مغنيسيوم-26، وهو ما يُعرف باسم *نصف العُمر*، بـ 700 ألف سنة. وكان يُعتقد أن وجود المغنيسيوم-26 في بعض الأحجار النيزكية التي لا بد أنها نشأت بسرعة نسبياً من الألمنيوم-26، يوحي بوجود مستعر أعظم قريب عندما تشكَّلَت المجموعة الشمسية، لأن النجوم العملاقة تصنع الألمنيوم-26 ومستعراتها العظمى تبثه.

ولكن، في عام 2012، أثبتت القياسات الجديدة التي أُجريت على النيازك أن مستويات الحديد-60، وهو نظير لا يتشكَّل سوى في المُستعرات العظمى، أقل بكثير مما يجب بالنسبة لمستعر أعظم قريب. ولتفسير الكمية الوفيرة من الألمنيوم-26، هناك نجم عملاق مجاور (ربما جاوَزَ حجمه 20 ضِعف الكتلة الشمسية) من نوعٍ معروف باسم نجم وولف-رايت (Wolf-Rayet) ربما نَبَذَ طبقاته الخارجية، وبَثَّ عنصر الألمنيوم-26 في السديم الشمسيّ. لقد كان الألمنيوم-26 مصدراً سائداً للحرارة في السديم الشمسي لملايين السنين الأولى القليلة. وبإذابة الثلج في أوائل المواد الصخرية، تسبّب الألمنيوم-26 في تسرّب الماء إلى المعادن المائية حيث كان آمناً هناك، خلافاً للثلج الذي تبخّر. ولولا وجود الألمنيوم-26، لما احتوت الأرض على المعادن الغنية بالماء، وربما لما تشكلت على سطحها المحيطات ولا الحياة.

وتُفسِّر فرضية السديم التوزيع الواسع لأنواع مختلفة من الكواكب. فالكواكب الموجودة في المجموعة الشمسية الداخلية (عطارد والزهرة والأرض والمريخ) أصغر نسبياً وصخرية التركيب،

بينما تلك الموجودة في المجموعة الشمسية الخارجية (المشتري وزحل وأورانوس ونبتون) كواكب عملاقة. في أثناء تشكّل القرص السديميّ، اكتسبت المادة المُنجذبة إلى الداخل طاقة حركية، وأمسى مركز القرص الذي تشكلت فيه الشمس شديد السخونة. وخلق ذلك تدرّجاً حرارياً من المركز الساخن للقرص إلى الجزء الخارجي البارد. وخارج الشمس، كان الضغط منخفضاً، ما كان يعني أن المواد الموجودة كانت صلبة أو غازية، لكنها لم تكن سائلة. وفي القرص الداخلي، كانت درجة الحرارة أعلى بكثير من أن تشكِّل الغازات كبخار الماء ثلجاً، ولكن كان في وسع المعدن والبخار الصخري التكثّف في كل مكان تقريباً داخل القرص. ومن ثم، فإن الكواكب التي تشكلت في المنطقة الداخلية، مثل الأرض، آلَ بها المآل إلى امتلاك ألباب غنية بالحديد ومُحاطة بوشاح صخري. بالمقابل، فإن الماء الذي تكثّف داخل الثلج من داخل مدار المشتري وحسب («الخطّ الجليدي»)، وإلى الخارج لمسافة أبعد، يوفر مادةَ أكثر لتكوين كواكب أضخم. ويمكن أن يتكثّف غاز الميثان أيضاً على هيئة جليد من مدار كوكب نبتون نحو الخارج.

والغالب على الظن أن الكواكب العملاقة قد تشكَّلَت قبل الكواكب الصخرية. ولعل المشتري وزحل تشكَّلا عندما بَلَغَت الألباب الصخرية حجماً يوازي عَشر كُتَل أرضية تقريباً، وكانت تتمتع بجاذبية كافية تتيح لها استقطاب المزيد والمزيد من الهيدروجين وغاز الهيليوم مباشرةً من القرص السديميّ حتى امتصت كل المُتاح في مدارها بالكامل. ولأنها كُرات عملاقة من الغاز في الأعم الأغلب، فإننا نطلق على هذه الكواكب اسم «العمالقة الغازية». ولقد حدثت هذه العملية منذ قرابة 10 ملايين سنة بعد نشأة الشمس. وكوكبا أورانوس ونبتون أصغر حجماً، واستقطبا نسبةً كبرى من المواد السائلة الجليدية، ومن ثمّ فإننا نطلق على هذين الكوكبين «العملاقين الجليديين». وخلافاً للنمو السريع لكوكب المشتري، امتد تشكُّل الكواكب الصخرية الداخلية فترة تراوحت بين 100 و200 مليون سنة. واتّحدَت الكواكب المُصَغَّرَة، وهي عبارة عن «أجزاء من الكوكب»، لتصنع أجساماً صخرية كبرى تُعرف باسم الأجنة الكوكبية التي يتراوح حجمها ما بين حجم القمر والمريخ. والتحمت العديد من الكواكب الأوليَّة بدورها لتُشكِّل الزهرة والأرض، بينما التحم عدد أقل ليكوِّن عطارد والمريخ.

ورغم أن الكواكب الداخلية راكمت مادةً في مكانها، فإن دَفعات الجاذبية من الكواكب العملاقة، ولا سيما المشتري، أرسلت كويكبات متشكلة إلى داخل المجموعة الشمسية. والأرجح أن الكويكبات الرطبة المتفرّقة التي نشأت فيما وراء مدار المريخ مسؤولة عن جلب الماء إلى الأرض الذي تحوَّلَ في نهاية المطاف إلى محيطاتنا وبحيراتنا. إننا نشرب مياه الكويكبات في حقيقية الأمر. وتُظهِر عمليات المحاكاة الحوسبيَّة أنّ كوكب المشتري نَبَذَ كميات من المواد الغنية بالماء أكثر مما بثَّ بداخله، ومن ثمّ لو كان للمشتري مدار أقل دائريةً، ونَبَذَ مواد أغنى بالماء، لانتهى الحال بالأرض من دون محيطات ومن دون حياة.

إننا نعلم أيضاً أن الكواكب لا تبقى ساكنة بضرورة الحال في مداراتها. إن الكواكب التي يطلق عليها اسم «المشتريات الحارَّة» هي كواكب خارج المجموعة الشمسية تشبه من ناحية كتلتها المشتري، وتدور في مدار حول نجومها المضيفة لها أقرب مرتين على الأقل من دوران الأرض حول الشمس. ويستحيل أن تكون تلك الكواكب الخارجية قد تكوَّنَت في الأماكن الموجودة فيها حالياً، لأنه لو صحّ ذلك لكانت ساخنة أكثر من اللازم. لقد اتضح أن الكواكب ترتحل بسبب الذيول الغازية الكبيرة والغبار الموجود في السديم المصاحب لتكوّنها، وكذلك تأثير جاذبية الأجرام الأخرى عليها.

لذا فإن فرضية السديم التقليدية تزداد تعقيداً بفعل «هجرة الكواكب» التي يمكن أن تدمّر صلاحية السُكنى الكوكبية أو تُيسرها في المجموعات الشمسية الخارجية، وفقاً للتفاصيل المتاحة. في الفصل التالي، سأتناول بالنقاش فكرة أن تكون حتى الكواكب العملاقة في مجموعتنا الشمسية ربما هاجرت نوعاً ما.

مع ذلك، فقد تأكّدت الفكرة الأساسية لفرضية السديم - التي مفادها أن الكواكب تشكّلت من قرص سديميّ - في ثمانينيات القرن العشرين عندما شوهدت بالمقاريب أقراص لحُطام يدور حول نجوم شابة. وحقيقة الأمر أنه ما زال هناك بعض الحُطام المتبقي في مجموعتنا الشمسية. فالمذنبات أجرام جليدية والكويكبات أنقاض صخرية لم تُستوعب قط في أيِّ منظومة. وبين الحين والآخر، ينتهي الحال بأجزاء صغيرة أُطيح بها من الكويكبات بفعل الاصطدامات إلى السقوط على سطح الأرض على هيئة أحجار نيزكية. ومن ثم، تُقدِّم لنا الأحجار النيزكية بيانات أساسية عن المرحلة الأولية لتكوُّن المجموعة الشمسية.

عُمر الأرض والقمر

لعل أعمق معلومة نستخلصها من الأحجار النيزكية هي عُمر الأرض والمجموعة الشمسية. منذ القرن الثامن عشر، أدّت الطبقات الكبيرة للصخور الرسوبية التي رآها علماء الجيولوجيا إلى الشك بأن الأرض، ومن ثَمَّ المجموعة الشمسية كلها، لا بد أن عمرها مديد، لكن كان يفتقر إلى دليل على ذلك.

كان أول مَن حاول قياس عُمر الأرض الجيولوجيّ الإنجليزي آرثر هولمز (Arthur Holmes)، الذي خطرت له فكرة فحص نظائر الرصاص التي تتكوَّن من اليورانيوم المُشع. يضمحل اليورانيوم-238 إلى سلسلة من النظائر غير المُستقرّة لعناصر أخرى حتى يصل إلى نظير الرصاص المُستقر (الرصاص-206). وعُمر النصف اللازم كي يتحوّل اليورانيوم-238 إلى الرصاص-206 هو 4.47 مليار سنة. وثمة نظير مُشِع آخر، ألا وهو اليورانيوم-235، يضمحل إلى الرصاص-207 ويبلغ عُمره النصفي 704 ملايين سنة. ومن ثم، بقياس كميات الرصاص-206 في مختلف الحبيبات المعدنية لصخرة ما، يمكنك تحديد عُمر الصخرة، إذ رغم أنه ربما كانت هناك كميات مختلفة من اليورانيوم في كل حبيبة، فإن معدّلات الاضمحلال الثابتة تضيف النسبة نفسها من الرصاص-206 إلى الرصاص-207 في فترة محدّدة. في عام 1947، طبَّقَ هولمز هذه الطريقة على قطعة من خام الرصاص من جزيرة غرينلاند، وقدَّرَ أن الأرض تشكلت منذ 3.4 جيجا سنة (والجيجا سنة تُساوي 1000 مليون سنة أو «مليار سنة»).

كانت لدى هولمز مشكلتان. الأولى أنه لم يكن في وسعه قط أن يتأكد من أنّ أقدم الصخور التي استطاع العثور عليها كانت قديمة قِدَم الأرض نفسها. والثانية أنه لتحديد عُمْر دقيق، كان هولمز بحاجة إلى أن يعرف النسبة الصغيرة الأصلية من نظائر الرصاص التي كانت موجودة عندما تشكَّلَت الأرض، وهي ما يُعرف باسم «الرصاص البدائي»، قبل أن يضيف اضمحلال اليورانيوم

اللاحق المزيد من ذرات الرصاص. أدرك الكيميائي الجيولوجي كلير باترسون (Clair Patterson) أن المشكلة الأولى يمكن تفاديها بتفحّص الأحجار النيزكية، لأنها مواد بِناء متبقية تشكَّلَت قُرب الفترة ذاتها التي تكوَّنت فيها الأرض. وأدرك أيضاً أن أنواعاً بعينها من الأحجار النيزكية، وتحديداً الأحجار النيزكية الحديديَّة، تحوي نسبة تكاد لا تُذكر من اليورانيوم، ومن ثمّ فإن نسبة نظائر الرصاص فيها تقدم مقياساً للرصاص البدائي. وبهذا النهج، حدّد باترسون في عام 1953 عُمر الأرض بدقةٍ بأنه 4.5 مليار سنة. وبلغ من الحماسة مبلغاً خشيَ على نفسه الإصابة بنوبة قلبية، فاضطرت أمه إلى نقله إلى المستشفى.

ومنذ ذلك الحين، منحتنا الطرائق المتطوّرة المُستعينة بالنظائر المُشعة مساراً زمنياً للأحداث التي أحاطت بتكوُّن الأرض. توحِي أقدم الحبيبات في الأحجار النيزكية بأن المجموعة الشمسية تكوَّنت قبل 4.57 مليار سنة. وتكوَّنَت الأرض بعدها بفترة طفيفة قبل 4.54 مليار سنة. وبعد ذلك، قبل نحو 4.5 مليار سنة، من الواضح أن جرماً يقارب حجمه حجم المريخ، يسمى ثيا (Theia) تيمّناً بالإلهة الإغريقية التي أنجبت إلهة القمر سيلين (Selene)، اصطدم بالأرض. وبحسب فرضية الاصطدام العملاق، فقد انطلق الحطام الذي انفجر بفعل الاصطدام إلى المدار المحيط بالأرض، والتحم ليكوِّن القمر.

والقمر بالغ الأهمية لعلم الأحياء الفلكي، لأن جاذبيته تُحقِّق الاستقرار لميل محور الأرض على مستوى مدارها الذي يساعد الأرض في الحفاظ على مناخ ثابت نسبياً. وفي الوقت الراهن، يميل محور الأرض بمقدار 23.5 درجة، لكن لو كان يمكن أن يتغيّر تغيراً واسع النطاق، لحدثت تقلّبات مناخية كبيرة. على سبيل المثال، عند الميل بمقدار 90%، ستميل الأرض على جانبها وسيتكون الثلج موسمياً عند خط الاستواء. وتُظهِر عمليات المحاكاة الحوسبية أنه لولا القمر، لتباين الميل المحوريّ للأرض بشكل فوضوي على فترات تمتد ملايين السنين، ولكان له نطاق كبير ربما تراوح ما بين صِفر وأكثر من 50 درجة. ولكان في إمكان أشكال الحياة الميكروبية الصمود في مواجهة التقلّبات المناخية العنيفة. لكن أشكال الحياة الحيوانية المتقدّمة والحضارات المماثلة لحضارتنا كانت ستواجه تحديات.

وبعد أن تتبعنا أثرنا الفلكيّ، فقد وصلنا الآن إلى مرحلة خلق مكانٍ للحياة؛ ألا وهو كوكبنا. لقد كانت هناك احتمالات فيما يتعلق بما إذا كان الماء الضروري للحياة قد أُرسل إلى الأرض، وضوابط خاصة بالمكان الذي يمكن أن يوجد فيه كوكب شبيه للأرض. وبعد ذلك، نتساءل بعد أن تشكَّلت الأرض، كيف ومتى نشأت الحياة عليها؟

الفصل الثالث أصول الحياة والبيئة

الفصل الثالث
أصول الحياة والبيئة

لا يوجد إلا النزر القليل من المعلومات عن الحقبة الأولى من تاريخ الأرض، حتى إنه ليس لها اسم محدّد. وتُعرف تلك الحقبة على نحو غير رسميّ باسم «الدهر الجُهنميّ» (Hadean)، وبدأت قبل نحو 4.5 مليار سنة عندما تشكَّلَ القمر، وانتهت في تاريخ لم يُتفق عليه، لكنه عادةً ما يُحدّد قبل 3.8 أو 4 مليارات سنة. ومن المرجح أن الحياة نشأت في الدهر الجهنميّ، لكننا لم نكتشف بعد دليلاً يدعم ذلك لأنه لا توجد صخور رسوبية من تلك الحقبة. وتتكوَّن تلك الصخور من طبقات من الحبيبات الرسوبية الموضوعة في الماء أو من ترسُّب المواد المنبوذة من البراكين، ومن ثمَّ فهي أفضل ما يحافظ على الآثار الأحيائية أو البيئية. وبالتالي فإن أفكارنا المتعلّقة بما حدث خلال حقبة الدهر الجهنميّ تتشكَّل لا محالة من بيانات متفرّقة شحيحة تدعمها قيود نظريَّة.

تقترح النظرية أن الحرارة الناتجة عن الاصطدام العملاق الذي شكَّلَ القمر لا بد أنها حوَّلَت الصخر إلى غاز. وبقي الغلاف الجوي للصخر المُـتَـبَخِّـر بضـع آلاف من السنين، ثمّ تكثَّفَ وتساقط على هيئة أمطار على سطح الصهارة المُذابة التي تجمّدت في نهاية المطاف وتحوّلت إلى قشرة. وفي فترة لاحقة، كان الغلاف الجوي قد تكوَّنَ أساساً من بخار شديد الكثافة لبضعة ملايين السنين قبل أن يتكثّف ليُشكِّل المحيطات.

متى بدأت القارّات بالتشكّل؟ لدينا بعض الدلائل المُستخلصة من حبيبات معدنية دقيقة يقل قطرها عن 0.5 ملم خلّفتها الخمسمئة مليون سنة الأولى تقريباً من تاريخ الأرض. وهذه هي أحجار «الزِركون»؛ وهي بلّورات من سيليكات الزركونيوم الرباعي ورمزها الكيميائي $ZrSiO_4$، حيث Zr الزركونيوم وSi السيليكون وO الأكسجين. وأحجار الزِركون صلبة جداً لدرجة أنها تظل على حالها حتى بعد تآكل الجلمود الذي كان يحتويها. وبعض أحجار الزِركون التي يتراوح عمرها ما بين 4.4 و4.0 مليارات سنة عُثِرَ عليها في الحصى المُتحجِّر في مرتفعات جاك الواقعة على بُعد ألف كيلومتر، تحديداً شمال مدينة بيرث غرب أستراليا. وتحتوي أحجار الزِركون على شذرات من الكوارتز، وهو شكل بلّوري من أشكال السيليكا SiO_2. ولعل الكوارتز اشتُقَّ من الجرانيت، وهو

نوع من الصخور البركانية الغنية بالسيليكا التي تُشكِّل السواد الأعظم من القارات. وبهذه الطريقة، توحي أحجار الزِركون بأن القشرة القاريَّة للأرض ترجع إلى 4.3 مليار سنة. وتدعم النظائر هذا الاستدلال. إن بعض أحجار الزِركون مُخصَّبَة بذرات الأكسجين-18 المستقرة مقارنة بذرات الأكسجين-16 المستقرة. وهذه الخصوبة تَحْدُث عندما تصنع مياه السطح الطين، ثمّ يُدفن الوحل بعد ذلك ويذوب تحت الأرض، فيُمرِّر بصمة النظير إلى الصخور البركانية.

من الأرجح أن الأرض تعرّضت في الدهر الجهنميّ لضربات عديدة من حطام خلَّفه تكوُّن المجموعة الشمسية، لكن لم يكن أيٌّ منها بقوة الاصطدام الذي شكَّلَ القمر. وكان بإمكان طاقة عدد محدود من الصدمات الكُبرى أن تُبخِّر المحيط بأكمله أو بضع مئات الأمتار العليا منه. ولو حدث ذلك، لكان من المفترض أن تبدأ الحياة من جديد، أو لعلها اختُزِلَت فقط في تلك الميكروبات التي اتخذت لنفسها ملجأً تحت الأرض واستطاعت أن تصمد في مواجهة الحرارة. والواقع أن الاصطدامات المُعَقِّمَة للأرض ربما فسَّرَت طبيعة السَلَف المشترك الأخير لأشكال الحياة كلها على الأرض. تقتفي الوراثيات السلف المشترك وصولاً إلى «أليفة الحرارة» (thermophile، انظر الفصل الخامس)، وهي عبارة عن ميكروبات تعيش في البيئات الحارّة. ويوحي تحليل الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين أساساً بأن «جدتنا الأقدم» كانت «أليفة الحرارة». وربما يرجع ذلك إلى أنّ أليفات الحرارة كانت الناجية الوحيدة من الاصطدامات المهولة التي أصابت الأرض.

الأرض الآن ليست آمنة بالكامل من الاصطدامات الكارثية المُحتملة. على سبيل المثال، الكوكب القزم كايرون (Chiron) شبيه بالمذنبات ويبلغ عرضه نحو 230 كيلومتراً ويقع في النظام الشمسي الخارجي الذي يقطع مدار كوكب زحل. وفي يوم ما في غضون العشرة ملايين سنة المقبلة تقريباً، ستطيح دفعة من جاذبية زُحل بكايرون نحو الشمس أو بعيداً عنها. في الحالة السابقة، نجد أن احتمالات اصطدام كايرون بالأرض ستكون أقل من واحد في المليون. لكن لو اصطدم كايرون بها، لحوَّلَت الحرارة بضع مئات الأمتار العليا للمحيط إلى بخار، ولأجدبت الأرض وصولاً إلى نحو خمسين متراً عُمقاً. وربما تمسي أليفات الحرارة أسلافاً للحياة اللاحقة في نوع من ظاهرة الأُلفة التطوريَّة، لو صَحَّ تفسير الاصطدام للسلف الأليف الحرارة.

وتُعرف الصحوة الأخيرة لاصطدامات الدهر الجهنمي الكبيرة باسم «القصف الشديد المتأخر» (Late Heavy Bombardment)، وقد وقعت قبل ما يتراوح بين 4 و3.8 مليار سنة. وتشهد الفوّهات الموجودة على سطح القمر بهذا القصف الشديد. ولقد تم تحديد عُمر الصخور التي عاد بها روّاد رحلة «أبولو» الفضائية إلى الأرض باستخدام النظائر المُشعة، وأثبتت أن العديد من الفوهات الموجودة على سطح القمر تشكلت خلال فترة المئتي مليون سنة الفاصلة.

لقد وضع علماء الفلك في مدينة نيس الفرنسية الفرضية الأساسية لتفسير القصف الشديد المتأخّر، ولذلك سُميَّت «أنموذج نيس». وتعوِّل الفرضية على الفكرة الأساسية التي مفادها أنه في نهاية الدهر الجهنميّ تحوَّلَت مدارات كوكب المشتري والكواكب العملاقة الأخرى. وتوحي الحسابات بأنه بعد تكوُّن المجموعة الشمسية، تسببت آثار الجاذبية المتبادلة في وصول زُحل والمشتري إلى حالة تُسمى «الصدى»؛ وفيها يدور زُحل حول الشمس مرة واحدة لكل دورتين للمشتري حول مداره. ولقد خلقت المحاذاة المنتظمة حثّاً بفعل الجاذبية جعل مداريْ زُحل والمشتري أقل دائريةً.

واضطرب مدارا نبتون وأورانوس بدورهما وتحرّكا إلى الخارج، فأصبحا أيضاً أكثر إهليجيةً. وكان من الممكن أن ينطلق نبتون من داخل مدار أورانوس، ثمّ يتجاوزه في هجرة خارجية، ولنثر الكوكبان، وخاصةً الأبعد منهما، أجراماً جليدية صغيرة، بعضها نحو المجموعة الشمسية الداخلية. في تلك الأثناء، أطاحت الجاذبية وحركة المشتري ببعض الكويكبات نحو المجموعة الشمسية الداخلية ودفعت كويكبات أخرى بعيداً. وخلال تلك الفترة، لا بدّ أن الأرض عانت حتى من اصطدامات أكثر من القمر نظراً لحجم الأرض الأكبر وجاذبيتها الأقوى.

وفي نهاية المطاف، استقرّت مدارات الكواكب العملاقة بعد أن عاثت خراباً ودماراً.

أصل الحياة

ليس من المعلوم تحديداً كيف نشأت الحياة. لعلها نشأت على الأرض أو حُمِلَت إليها بفعل الغبار الفضائي أو الأحجار النيزكية. وتسمى الفكرة الثانية التَبَزُّر الشَّامِل (panspermia)، ولا تحلُّ معضلة كيف نشأت الحياة، وإنما تزج بها في اتجاه آخر. فضلاً عن ذلك، ربما كانت هناك صعوبات تشوب البقاء والصمود عبر فترات انتقالية طويلة لو جاءت الحياة من حول نجوم أخرى. ولهذه الأسباب، سينصب تركيزنا على الأصل الأرضي للحياة.

هناك توافق واسع النطاق على أنّ أصل الحياة سبقته فترة من التطوّر الكيميائي، أو الكيمياء قبل الحيوية، نشأت خلالها جزيئات عضوية أكثر تعقيداً من جزيئات أبسط. وترجع تلك الفكرة إلى القرن التاسع عشر. ففي عام 1871، تخيل تشارلز داروين أن تلك العملية الكيميائية ربما حدثت في «بِركة صغيرة دافئة»، بحسب خطاب أرسله إلى عالم النبات جوزيف هوكر (Joseph Hooker):

كثيراً ما يزعمون أن جميع الظروف المواتية لأول خلق لكائن حيٍّ موجودة الآن، وكان من الممكن أن تكون موجودة في أيِّ وقت. ولكن، إذا كان في وسعنا أن نتخيّل (ويا له من شَرْطٍ كبير) أنه في بركة صغيرة دافئة تحوي جميع أنواع الأمونيا والأملاح الفسفورية، وفي وجود الضوء والحرارة والكهرباء، إلخ، تشكَّلَ مُركَّبٌ كيميائي، وكان جاهزاً لأن يخضع لتغييرات أكثر تعقيداً من ذي قبل، لكان من الممكن أن تُلْتَهم مثل تلك المادة على الفور في وقتنا الحالي أو تُمْتَص، وهي حالة ما كانت لتحدث قبل تشكُّل الكائنات الحية.

وهكذا خلصَ داروين إلى أن الحياة من المستبعد أن تكون قد نشأت اليوم، لأن الكائنات الحية تلتهم دوماً المركبات الكيميائية الضرورية لنشأتها. ومن ناحية أخرى، فإن الظروف الكيميائية لأصل الحياة لا بدّ أنها كانت سائدة قبل نشأة الحياة.

في عشرينيات القرن العشرين، أدرك عالِم الكيمياء الحيوية الروسي ألكسندر أوبارين (Alexander Oparin) وعالم الأحياء البريطاني جون بوردون ساندرسون هولدين (John Burdon Sanderson Haldane) أنّ البيئة التي نشأت تحت مظلتها الحياة كانت تفتقر إلى الأكسجين. فالغلاف الجوي الأرضي الغني بالأكسجين هو نتاج عملية التخليق الضوئي للنباتات والطحالب والبكتيريا. والغلاف الجوي الخالي من الأكسجين أكثر ملاءمةً للكيمياء قبل الحيوية لأن الأكسجين يحوِّل المادة العضوية إلى ثاني أكسيد الكربون الذي يَحُول دون بِنَاء الجزيئات المُعقَّدَة. ولقد ذكر الجيولوجيّ المُعاصر ألكسندر ماكغرِيغور (Alexander MacGregor) في عام 1927 بأنه عثر على صخور رسوبية يرجع تاريخها إلى «الدهر السحيق» (ما بين 3.8 و2.5 مليار سنة) أثبتت أن الغلاف الجوي العتيق كان يفتقر إلى الأكسجين. ولاحظ ماكغريغور تحديداً أنّ معادن خام الحديد فيما يُعرف الآن بـ «زيمبابوي» كانت غير مُؤكسدة، خلافاً لأكاسيد الحديد الملوّنة بلون الصدأ في الصخور الرسوبية الحديثة التي تنشأ عندما يتفاعل أكسجين الغاز الجويّ مع المعادن الحاوية للحديد. وفي يومنا هذا، تدعم استنتاجَ ماكغريغور بياناتٌ كثيرة أخرى (الفصل الرابع).

اقترح أوبارين وهولدين أيضاً أنّ الغازات في الغلاف الجوي الأوليّ للأرض تحوّلت بفعل أشعة الشمس فوق البنفسجية أو بفعل البرق إلى جزيئات عضوية. وفي خمسينيات القرن العشرين، خضعت تلك الأفكار للاختبار عندما ابتكر ستانلي ميلر (Stanley Miller)، وكان أحد طلاب الكيميائي الحائز جائزة نوبل هارولد يوري (Harold Urey)، تجربةً في جامعة شيكاغو. فقد وُضِعَ مزيج من الأمونيا والميثان والهيدروجين وبخار الماء في قارورة، ومُرِّرت شرارات كهربائية عبر الغاز لمحاكاة البرق. واكتشف ميلر أن الماء المائل للصفرة تكثَّفَ في قاع القارورة. واحتوت هذه الرُّسابة الداكنة على جزيئات عضوية، بما في ذلك الكثير من الأحماض الأمينية التي تُعدُّ لَبِنات بناء البروتينات. وفي تلك الأثناء، احتفت وسائل الإعلام بتجربة ميلر-يوري لحلّها معضلة أصل الحياة علميّاً. وقيل إن الحياة بدأت في «حساء بدائي» صنعته كيمياء الغلاف الجوي. وفي عام 1953، عندما دوَّنَ ميلر النتائج التي خلص إليها، كان هناك رأي سائد (يرجع إلى عصر أوبارين وهولدين) مفاده أن المادة الوراثية هي البروتين، ولكن قبل نشر بحث ميلر بشهرٍ واحد فقط، اكتُشِفَ الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين بوصفه الأساس الحقيقي للوراثة. وفي وقت لاحق، أسفرت التجارب على شاكلة تجربة ميلر-يوري عن جزيئات تحوي حلقات سداسية من ذرات الكربون والنيتروجين والهيدروجين، وهي الحلقات الموجودة داخل الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين.

ومع ذلك، ألقى الكيميائيون الجيولوجيون بظلال الشك على تجربة ميلر-يوري، لأنهم يَحتَّجون بأن الغلاف الجوي الأوليّ للأرض لم يكن على الأرجح غنياً بالهيدروجين بحسب ما افترض ميلر. فالبراكين أمدّت الغلاف الجوي الأرضي بالغازات على مدار فترات زمنية طويلة، لكن غالبية الغازات البركانية تتألف من بخار ماء (H_2O)، ونسبة تقل في المتوسط عن 1% من الهيدروجين

(H_2). وبالمثل، يخرج الكربون البركاني على هيئة ثاني أكسيد كربون (CO_2) بدلاً من الشكل المُهدْرَج للميثان (CH_4)، بينما ينبعث الهيدروجين على هيئة ثنائي النيتروجين (N_2) بدلاً من الأمونيا (NH_3).

ويُعتقد أن الغلاف الجوي في الدهر الجهنميّ احتُفِظَ به غالباً بفعل الغازات المنبعثة من البراكين. ومن ثم، من المفترض أن الهواء تألّفَ في أغلبه من ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. وبالطبع، يعتمد الأمر على مدى قِدَم التاريخ الذي نرجع إليه. ففي مرحلة تكوّن الأرض، يؤدّي تبخّر الأجسام الصادمة الكبيرة إلى إنتاج أغلفة جوية غنية بالهيدروجين لو كانت تلك الأجسام غنية بالقدر الكافي بالحديد بحيث توفّر النوع الملائم من الكيمياء الذي يحقّق الاستقرار للهيدروجين في الانفجار التصادميّ. لكن في مرحلة مبكرة، كان السواد الأعظم من الغلاف الجوي بخاراً، ولم تكن المحيطات قد تكثّفَت بعد. وبعدما تكوَّنَت المحيطات، كانت الأغلفة الجوية التي تكوَّنَت بفعل تبخير الاصطدام سريعة الزوال. ونظراً للشكوك التي تكتنف تكوُّن الغلاف الجوي إبَّان الدهر الجهنميّ، اقترح علماء الأحياء الفلكية مصادر للكربون العضوي بخلاف تلك التي افترضها ميلر ويوري.

ومن البدائل المُقترحة أنّ الكربون العضوي جاء من الفضاء. فبعض الأحجار النيزكية الغنية بالكربون تحوي أحماضاً أمينية وموادّ كحولية وغير ذلك من المركّبات العضوية التي ربما غَرَسَت في الأرض المواد الضرورية للكيمياء قبل الحيوية. على سبيل المثال، يحتوي حجر مورتشيسون النيزكي الذي سقط على مدينة مورتشيسون الأسترالية عام 1969 على أكثر من 14 ألف جزيء مختلف. كما إن جُسيمات الأحجار النيزكية الدقيقة التي يتراوح حجمها ما بين 0.02 و0.4 ملم حالياً تجلب نحو 30 مليون كجم من الكربون العضوي إلى الأرض كل سنة. ويمكن أن يسقط الكربون العضويّ سليماً على سطح الأرض لأن الجُسيمات الدقيقة لا تحترق بالضرورة في الغلاف الجوي. علاوة على ذلك، فإن الأجزاء الداخلية للمذنّبات غنية بالمادة العضوية، وربما أدت دوراً مثيلاً للأحجار النيزكية في إطلاق شرارة بدء الحياة إذا صمدت المادة العضوية في مواجهة صدمات المذنّبات على الأرض.

ثمّة مصدر آخر محتمل للكربون العضوي هو المنافذ المائية الحرارية في أعماق البحار. والمنفذ المائي الحراري هو بقعة ينبعث منها الماء الساخن من قاع البحر. ويتشكّل قاع البحر الجديد عند الحيود في منتصف المحيط، إذ تنفصل الصفائح التكتونية للأرض، وتعلو الصهارة من طبقة الوشاح، فتسُدُّ الفراغ. وتتدفّق مياه البحار عبر الشقوق على مقربة من الحيود، وتسخن بفعل الصهارة الملتهبة، فترتفع حاملةً معها المواد الناتجة عن التفاعلات الكيميائية بين المياه والصخور، مثل الهيدروجين وكبريتيد الهيدروجين والحديد المُنْحَل. وعندما تصطدم المياه الحمضية الحارّة بمياه المحيط الباردة (2 درجة مئوية)، فإنها تنتج تجمُّعاً من الجُسيمات المُترسِّبَة التي تحتوي على معدن البيريت الداكن اللون، وهو معدن كبريتيد الحديد (FeS_2)، حيث ترمز Fe إلى الحديد وS إلى الكبريت). ولذلك تُعرف هذه المنافذ المائية الحرارية باسم «المداخن السوداء». وتقترح واحدة من الفرضيات أن الحياة نشأت على سطح معادن البيريت. لكن المداخن السوداء حارَّة جداً، إذ تصل حرارتها إلى نحو 350 درجة مئوية، لذا فإن السواد الأعظم من الباحثين الذين يفضّلون فرضية

نشأة الحياة في قاع البحار ركّزوا على المنافذ المائية الأقل حرارة التي تُقدّر حرارتها بنحو 90 درجة مئوية، وعلى القلوية منها لا الحمضيَّة، الواقعة بعيداً عن الحيود في وسط المحيط.

وتحت المنافذ المائية القلوية، يستطيع الهيدروجين الناتج عن التفاعلات بين الماء والصخور أن يتَّحِد مع ثاني أكسيد الكربون ليصنع الميثان والجزيئات العضوية الكبرى. وفي الدهر الجهنميّ، كان من الممكن للمسامِّ الدقيقة في البنى المعدنية التي خرجت من المنافذ، من ناحية المبدأ، أن تحوي جزيئات بسيطة وتجمِّعها بحيث تسمح لها بالتفاعل وصنع جزيئات قبل حيوية أكثر تعقيداً.

في المنافذ القلويَّة أيضاً، نظراً لأن السائل النابع أكثر قلويةً من ماء البحر، يوجد تدرُّج طبيعي في الأسّ الهيدروجيني (pH) شبيه بالتدرّج الموجود في الخلايا. لو نشأت الحياة في مثل هذه البيئة، فلعل ذلك يفسّر علة ارتباط إنتاج الطاقة الوثيق بتدرّجات الأس الهيدروجيني.

تخلق الحياة الطاقة من المحرّكات الكهربائية المجهرية المُدمجة داخل أغشية الخلايا التي تعمل اعتماداً على التيارات الكهربائية المُحفَّزَة بدرجات القلوية عبر الأغشية. وتعجز الكلمات عن أن تفي تلك الآلات الجزيئية المذهلة حقّها. ومن ثمَّ أقترح عليك عزيزي القارئ أن تنقِّب في شبكة الإنترنت عن «الرسوم المتحرّكة للأدينوسين ثلاثي الفوسفات سينثاز» (ATP synthase animations). تُستخدم طاقة الأيض في خلق درجة أس هيدروجيني مختلفة على جانبيْ غشاء الخلية، إذ يكون الجانب الخارجي أكثر حمضيةً عادةً من الداخلي. وهذا الفارق هو تَدرُّج بروتونيّ لأن الأس الهيدروجيني مقياس معكوس لتركيز أيونات الهيدروجين المشحونة بشحنة موجبة (البروتونات) في المحلول؛ وكلما كان التركيز أعلى، تدنّى الأس الهيدروجيني (وارتفعت الحمضية). والتدرج البروتونيّ هو بمثابة بطارية أساساً. فعندما تُفرَّغ شحنة هذه البطاريات، يتدفّق التيار الكهربائي عبر التوربين الجزيئي في غشاء الخلية، ويولِّد الجزيئات التي تُخزِّن الطاقة. وجزيئات أدينوسين ثلاثي الفوسفات (الأتب) هي حاملات الطاقة في جميع الخلايا. على سبيل المثال، يحتوي جسم الإنسان عادةً على 250 جراماً من الأتب، ويستخدِم ما يوازي وزن الجسم من الأتب كل يوم بينما يُصنع هذا المُركَّب الكيميائي أو يُعاد تصنيعه في الجسم.

وتُعرف عملية تخليق الأتب المذكورة أعلاه باسم «التناضح الكيميائي» (chemiosmosis)، الذي يشتمل على كلمة «تناضح» التي تعني تحرّك المياه عبر غشاء، لأن حركة البروتون تناظرية. والتناضح الكيميائي عجيب جداً إذا ما قُورن بفكرة تخليق الطاقة المألوفة من التفاعلات الكيميائية، لدرجة أنه عندما اقتُرِحَ مفهومه في عام 1961 على لسان عالم الكيمياء الحيوية البريطاني بيتر ميتشل (Peter Mitchell)، انهال عليه السواد الأعظم من علماء الكيمياء الحيوية بالنقد اللاذع. وفي نهاية المطاف، بُرِّئت ساحة ميتشل عام 1978 عندما نال جائزة نوبل. وبالنظر إلى أن التناضح الكيميائي شامل لجميع أشكال الحياة الأرضية، وربما ارتبط بأصلها، فمن المثير للاهتمام أن نتساءل عما إذا كانت التدرّجات الأيونية أساسية للحياة في أيِّ مكان.

وفي وقتنا الحالي، ما زال مصدر الكربون العضويّ الذي ساقنا إلى أصل الحياة - سواء أكان الغلاف الجوي أم الفضاء أم المنافذ المائية الحرارية - موضوعاً مُعلَّقاً. لكن بالنظر إلى هذا المصدر، لا بد أن المُركَّبَات العضوية تركّزت بالشكل الذي يسمح بحدوث التفاعلات الكيميائية التي

ربما وقعت عندما تكوَّنَت طبقات رقيقة على الأسطح المعدنية التي ربما نشأت بدورها من الجفاف أو البرودة. وبعد ذلك، يمكن للمواد العضوية البسيطة أن تتَّحِد لتصنع جزيئات أكثر تعقيداً. لكن النُظُم الكيميائية بحاجة إلى العديد من الخصائص الأخرى قبل أن تُعدَّ «حيَّة». والخصائص الأساسية هي الأيض، وأن تُحاط بغشاء شبه نفّاذ، والتكاثر الذي يجمع الصفات الوراثية في جينوم.

وفيما يتعلق بالخاصية الأخيرة، ثمّة مشكلة يسهل التعاطي معها في التجارب المخبرية مقارنةً بمشكلة أصل الحياة؛ ألا وهي المرحلة المُفترضَة للحياة المبكّرة جداً المعروفة باسم «فرضية عالم الحمض النووي الريبي» (عالم الرنا) التي سبق فيها الرنا وجود الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (الدنا) بوصفه المادة الوراثية. يوفر الدنا في الخلايا الحديثة مجموعة من التعليمات التي تُنسخ داخل جزيئات الرنا التي تحمل المعلومات الضرورية لصنع بروتينات بعينها. والدنا شبيه بالرنا، غير أنه أكثر تعقيداً، ومن ثمّ فمن المنطقي الزعم أن الرنا تطوّر أولاً. فضلاً عن ذلك، اكتُشِفَ في ثمانينيات القرن العشرين أن بعض جزيئات الرنا، المعروفة باسم ريبوزيم (ribozyme)، يمكنها أن تعمل عمل المُحفزات. ومن ثم فمن المنطقي القول إن الرنا حفَّزَ في فترة من الفترات استنساخه الذاتي وتجميعه من جزيئات أصغر حجماً. وفي المرحلة التالية، يبدأ الرنا في صناعة البروتينات التي يصبح بعضها محفزات أفضل من الرنا نفسه. وفي نهاية المطاف، حلَّ الدنا محل الرنا لأنه أكثر استقراراً ويمكن أن يكون أكبر حجماً، وهما سمتان تخلعان ميزات تكاثرية.

وثمَّة خاصية جوهرية أخرى في أصل الحياة هي تغليف الجينوم داخل غشاء الخلية. وكانت هذه الخاصية مفيدة لسببيْن: أولهما زيادة معدّلات التفاعل بتركيز المواد الكيميائية الحيوية، وثانيهما مَنْحُ ميزة تطوّرية للجزيئات الذاتية الاستنساخ. على سبيل المثال، يستطيع جينوم الحمض النووي الريبوزي (الرنا) الذي أنتج بروتيناً مفيداً أن يحتفظ به لنفسه داخل الخلية، فيفضِّل بذلك سلالته الخاصة.

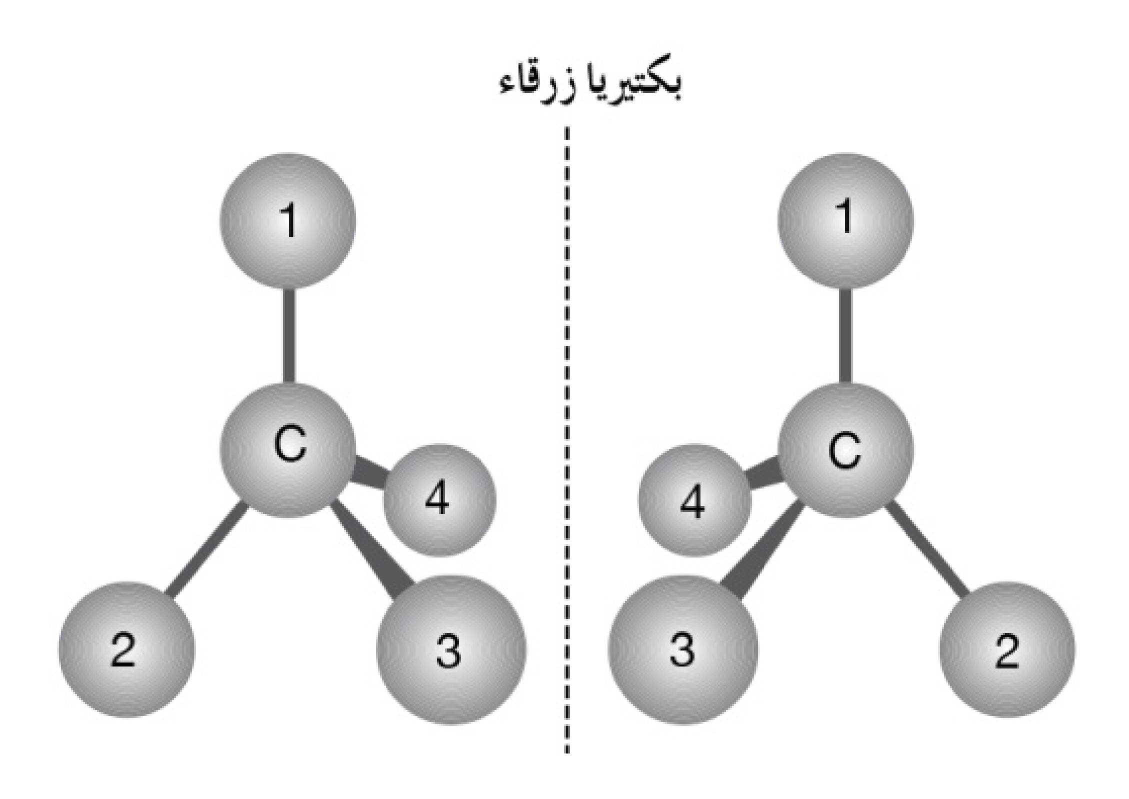
لقد صُنعت البِنى «ما قبل الخلويَّة» في المختبر. وتشكَّلَت بِنى كرويَّة عندما خُلِطَت الزيوت بالماء، وهي الظاهرة التي نألفها جميعاً في المطبخ. وهذه الأغشية الزيتية أو الدُهنية أدت إلى تخليق أغشية تحيط بالخلايا الحديثة، وكانت أسطحاً للكيمياء قبل الحيوية.

ولعل أحداثاً لاحقة وقعت على النحو التالي: عاش الرنا في البنى قبل الخلوية، وتطوّرت الخلايا التي تحتوي على جينوم الرنا، ثمّ تولّت خلايا تحتوي جينوم الدنا (الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين) مقاليد الأمور من الرنا (الحمض النووي الريبي). وفي المرحلة ذاتها، تطوَّر الأيض أيضاً، ربما بعد زوال عالَم الرنا. لكن يبقى النقاش محتدماً حول مسألة أيهما سبق الآخر؛ الأيض أم الاستنساخ الجينيّ. علاوة على ذلك، ما زال الموقع الفعلي لأصل الحياة وظروف وخطوات نشأتها محل ريبة، وما برحت ضمن نطاقٍ بحثي مبشر لتقدمٍ كبير.

عدم التناظر المرآوي (أو فن التصفيق بيدٍ واحدة)

إن وصف أصل الحياة لا يكتمل من دون ذِكْر جانب وثيق الصلة من جوانب الكيمياء الحيوية: بالنسبة للجزيئات الحيوية التي لها بنيتان متماثلتان، تستغل الحياة على الأرض بنيةً واحدة فقط منهما ولا تستغل الاثنتين معاً. وتُعرف خاصية امتلاك تناظر انعكاسي باسم «عدم التناظر المرآوي» (chirality)، وهي الكلمة المُشتقة من كلمة «cheir» اليونانية ومعناها «يد»، نظراً لأن يدي المرء صورتان مرآويتان ولا يمكن أن تتطابق إحداهما فوق الأخرى (مُتجهتين في الاتجاه ذاته لأعلى). وإذا لم تكن مقتنعاً بأن بنية اليد اليسرى مختلفة عن اليمنى، حاول أن تنتعل حذاءك في قدمك المخالفة طول اليوم!

ينشأ عدم التناظر المرآوي في الجزيئات الحيوية إذا أُحيطت ذرّة كربون مركزية بأربع مجموعات مختلفة من الذرّات. تنظِّم تلك المجموعات نفسها بشكل طبيعي على هيئة شكل رباعي الأسطح، وهو هرم ذو أربعة وجوه مُثلثة الشكل. ولو رقَّمنا المجموعات بالرقم «1» عند قمة الشكل الرباعي الأسطح، فسيكون في المستطاع ترقيم الأقدام الثلاثية الأوجه في اتجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاه عقارب الساعة كما هو موضح أدناه:



الجزيئان الموضحان في الصورة «متعاكسان» لأنه يستحيل إطباق أحدهما على الآخر. وهذه الجزيئات تُعرف باسم النظائر المرآوية (enantiomers)، وهي مُشتقة من اليونانية «enantios morphe» وتعني «الشكل المعاكس». لننظر في نظير مرآوي بعينه؛ ألا وهو الحمض الأميني ألانين. سيكون الرقم «1» في هذا الحمض ذرة هيدروجين، والرقم «2» مجموعة كربوكسيل (COOH)، والرقم «3» مجموعة أمين (NH_2)، والرقم «4» مجموعة ميثيل (CH_3). وبِحُكم الاصطلاح، في ظل الترقيم في اتجاه عقارب الساعة للمجموعات من 2 إلى 4، يقع الألانين في الجهة اليمنى أو يتخذ الشكل «D» نسبة لكلمة «dextro» اليونانية التي تعني «اليمين». وفي ظل الترتيب في عكس اتجاه عقارب الساعة، يقع الألانين في الشكل «L» نسبةً إلى كلمة «laevo» اليونانية التي تعني «اليسار». والمدهش أن الحياة على الأرض تستعين بالأحماض الأمينية الميسّرة في البروتينات بالكامل تقريباً، وبالسكريات الميمّنة حصراً تقريباً أيضاً سواء في الدنا، أو في جدران الخلايا أو في عملية التخليق. ومع ذلك، عندما تُصنع مادة غير متناظرة مرآوياً في المختبر، عادةً ما تنتج خصائص متساوية ذات أشكال ميسّرة وميمّنة تُعرف باسم «المزيج العنقودي» (racemic mixture).

من الممكن أن يكون للجزيئات غير المتناظرة مرآوياً آثار مختلفة تماماً رغم صيغها الكيميائية المتطابقة. ومن الأمثلة على ذلك العقارُ السيّئ السمعة ثاليدوميد. فشكله الميمّن يُعالج غثيان الصباح لدى الحوامل، أما النسخة الميسّرة منه فتُحفّز تشوّهات خِلقيَّة جسيمة. ثمَّة مثال أخف أثراً وجسامة، وهو مُركَّب الليمونين المُستخدم لإضافة نكهات: شكله الميمّن ذو مذاق أشبه بالليمون، بينما الشكل الميسّر ذو مذاق أشبه بالبرتقال.

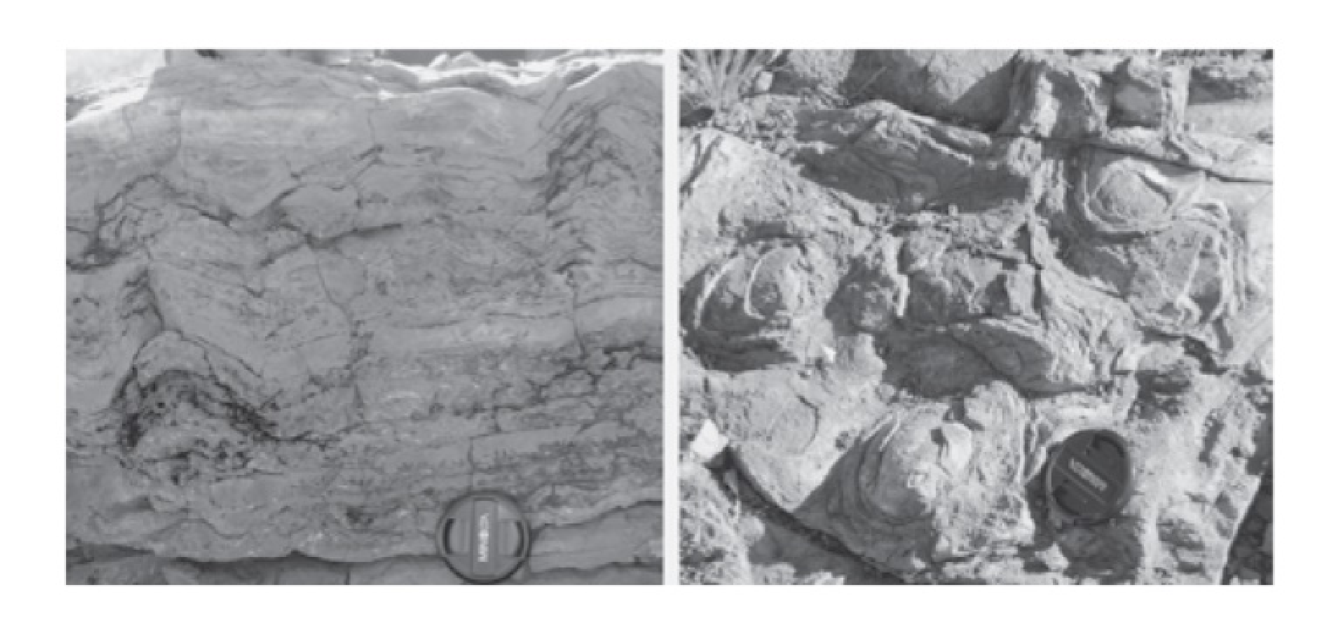
ما الذي أحْدَثَ عدم التناظر المرآوي المشترك - أو ما يُعرف بتجانس عدم التناظر المرآوي - الذي تشترك فيه جميع أشكال الحياة؟ هناك فرضيتان عامتان. الأولى أن الجزيئات العضوية التي بدأت منها الحياة كانت تحوي فائضاً من نظير مرآوي واحد تَضَخَّمَ لاحقاً. وتتضمن العمليات الفيزيائية التي استُدعِيت لحثّ هذا الفائضِ الضوءَ المُستقطبَ من النجوم، الذي ربما أدى إلى أن تطوّر الجزيئات العضوية التي غُرست في الأرض تحيّزاً غير متناظر مرآوياً أثناء تخليقها في الفضاء. وكبديل لذلك، يجوز أن ينتج الإشعاع المُستقطب من الاضمحلال الإشعاعيّ فائضاً متناظراً مرآوياً. ومن بين المشكلات التي تشوب مثل هذه الأفكار المرتبطة بالإشعاع أن الفائض غالباً ما يكون محدوداً، أي أقل من 1%. والفرضية الثانية مفادها أن الكيمياء ما قبل الحيوية جمعت فقط وعلى نحو تفضيليّ نظيراً مرآوياً واحداً من بين النظائر المرآوية. على سبيل المثال، لعل الامتزاز[1] على سطح معدني يتسم بالانتقائية غير التناظرية. إن حركيَّة التفاعل الكيميائي تكون أكثر كفاءة عموماً في المادة الخام منها في المزيج، ومن ثمّ قد يسبّب ذلك المزيد من التضخيم. وقد تتطلّب عملية بيولوجية واحدة - مثل استنساخ الجينوم - تجانسَ عدم التناظر المرآوي. والأرجح أن تجانس عدم التناظر المرآوي كان ضرورياً للاستنساخ في أنموذج عالَم الرنا، لأن جدائل الرنا المستنسخة التي تتسم بعدم التناظر المرآوي ذاته، هي فقط التي تنتظم في صفّ مع جديلة قالب الرنا.

علامات أوائل أشكال الحياة

رغم أن أصل الحياة ما زال لغزاً، نجد في أقدم الصخور الرسوبية على الأرض علامات مُحتملة على الحياة. وربما لم يكن من قبيل المصادفة أن هذه الصخور (الممزوجة بتدفّقات بركانية) يرجع تاريخها إلى أواخر حقبة القصف الشديد المتأخر، أي قبل نحو 3.8 مليار سنة. وعُثِرَ عليها في منطقة حزام إيسوا (Isua) داخل الجزء الجنوبي الغربي من جزيرة غرينلاند. وهي تُشكِّل مشهداً طبيعياً قاتماً مهيباً يبدو أشبه بأرض موردور (Mordor) الخيالية، لكنها جليدية، وهي مدهشة من ناحية قدرتها على أن تفسر لنا الكثير عن بدايات وجود الأرض. وهناك حصى صار مستديراً بفعل حركة الماء. وبعض الرواسب الموجودة تحت البحر تحوي أيضاً شذرات من الكربون على هيئة غرافيت. ويوحي تحليل النظائر بأن هذا الكربون كان في فترة من الفترات جزءاً من الميكروبات التي تعيش في المحيطات. وللكربون نظيران مستقران: الكربون-12 والكربون-13. وتميل الحياة إلى تركيز نسبة مئوية محدودة إضافية من ذرات الكربون-12 في نسيجها مقارنةً بالكربون-13، لأن الجزيئات التي تحوي ذرات كربون-12 أخف وزناً تتفاعل بوتيرة أسرع في الكيمياء الحيوية. والغرافيت الموجود في «إيسوا» مُخصَّب بالكربون-12 بنسبة 2% تقريباً، وهي النسبة الشبيهة بنسبته في الميكروبات البحرية. لذا يستنتج بأن الميكروبات البحرية هلكت وغاصت في الرواسب إذ انضغط الكربون لاحقاً وتحوَّل إلى غرافيت.

عُثِرَ في شمال غرب أستراليا على دليل على بدايات الحياة محفوظ بشكل أفضل يرجع إلى 3.5 مليار سنة. ففي ثمانينيات القرن العشرين، عَثَرَ زميلي روجر بيويك (Roger Buick) على صخور ستروماتوليت أحفورية ترجع إلى ذلك التاريخ، على مقربة من منطقة نورث بول في شمال غرب أستراليا (الشكل 2). ولقد أطلق أسترالي يميل إلى المزاح على هذا المكان اسم «القطب الشمالي» لأنه واحد من أكثر المناطق قيظاً وتعرّضاً للشمس على وجه البسيطة. وصخور الستروماتوليت هي بنى رسوبية رقائقية تصنعها التجمّعات الميكروبية التي تقوم بعملية التخليق الضوئي في المياه الضحلة بما يكفي لأن يتخللها الضوء. وغالباً ما تتخذ صخور الستروماتوليت شكل قباب من رقائق متغضّنة. وهذه القِباب مبنية من ترسّبات حبيسة على هيئة صفائح من الميكروبات تُعرف باسم «الحصائر الميكروبية» (microbial mats)، وتنمو لأعلى صوب ضوء الشمس. وعلى صخور الستروماتوليت الحديثة، يُعدُّ الجزء الحيُّ - ألا وهو الحصيرة ذاتها - واجهةً لا أكثر يبلغ سُمكها نحو سنتيمتر واحد، ولها ملمس أشبه بالتوفو (نوع من أنواع الجبن النباتي)، وتستقر فوق طبقات معدنية مُتراكمة. لو تسنى لك السفر رجوعاً إلى أرض الدهر السحيق، لرأيت سواحل تغطيها صخور الستروماتوليت في شتى أرجاء العالم. واليوم نجد أن تلك الصخور نادرة لأن ثمّة أنواعاً محددة من الأسماك والحلزونات (التي لم يكن لها وجود أثناء الدهر السحيق) تتغذى على الحصائر الميكروبية التي تصنع تلك الصخور. ومن ثمَّ توجد صخور الستروماتوليت الحديثة فقط في البحيرات الساحلية الضحلة أو البحيرات العميقة، إذ تكون المياه مالحة أكثر من اللازم لحياة تلك الحيوانات الشرهة.

تساءل بعض المشككين عما إذا كان من الممكن أن تتشكَّل بِنى منطقة «نورث بول» من دون أيِّ شكل من أشكال الحياة، ومن ثمّ فإنها لا تُعدُّ في واقع الأمر صخوراً من نوع



2. *يسار*: قطاع مُستعرض من أقدم صخور ستروماتوليت أحفورية في العالم في تكوين «دريسر» الواقع في منطقة «نورث بول» الأسترالية. يمين: مَسْقَط أفقي لسطح التراصف القاعدي لصخور الستروماتوليت، وفيه تظهر قِممها. ويبلغ قُطر غطاء العدسة 5 سم لأغراض القياس.

ستروماتوليت، لكن غالبية علماء الأحياء الفلكية يَقْبَلون تراثها العضويّ، لأنها تتمتع بالعديد من السمات التي نتوقّعها من البيولوجيا. فأحافير صخور الستروماتوليت تحوي صفائح ذات تغضّنات غير منتظمة بشدة من الصعب تفسيرها على أنها طيَّات خلقتها عمليات فيزيائيَّة محضة. علاوة على ذلك، فإن الصفائح تزداد غلظةً عند قمة الثنيات المُحدَّبَة، وهو ما يحدث بالضبط عندما تنمو الميكروبات التي تقوم بتمثيل الضوء حيثما يزداد ضوء الشمس. وفي المناطق الخفيضة بين الثنيات، هناك شذرات تُفَسَّر على نحو منطقي بأنها قِطَع من حصيرة ميكروبية نزعتها الأمواج في البحر. وتحوي تلك الشذرات طبقات رقيقة ومتغضّنة وتضم كربوناً عضوياً. ويوحي مزيج تلك المشاهدات بأن صخور الستروماتوليت الموجودة في منطقة «نورث بول» هي حقاً أقدم بِنى أحفورية تراها العين المُجردة على الإطلاق.

يمكننا في رحلة البحث عن دليل على الحياة السابقة أن ننقّب أيضاً عن أجساد مفردة هالكة لكائنات حية وحيدة الخلية، إذ إنّ الميكروبات فقط وُجِدَت منذ زمن بعيد في تاريخ الأرض. وتوجد تلك الأحافير الدقيقة، التي لا يمكن رؤيتها إلا تحت المجهر، في الصخور الرسوبية، مثل الشيرت (وهو صخر دقيق الحبيبات غني بالسيليكا؛ ويُعدُّ الصوَّان مثالاً شائعاً عليه) والطفال، وهو صخر رسوبي دقيق الحبيبات كان في فترة من الفترات وحلاً.

ويستخلص علماء الجيولوجيا العاكفون على دراسة الأحافير الدقيقة عيّنات صخرية من بيئات مُحتملة، ويرجعون بها إلى المختبر حيث يقطعونها تقطيعاً ويعقدون الآمال على العثور على شيء ما تحت المجهر. وإنها لعملية مرهونة بالصدفة والعشوائية. وبوجه قبيح، تطلُّ علينا أيضاً مشكلةُ التمييز بين أشكال الحياة والأشكال التي تخلو من الحياة، لأن الحبيبات المعدنية تبدو أحياناً أشبه بالخلايا الأحفورية. وبالتالي فإن الأحافير الدقيقة تكون أكثر إقناعاً إن أظهرت علامات على انقسام الخلايا أو سلوك استعماري أو بِنى خيطيَّة تتجلّى عندما تلتحم الخلايا على هيئة صفوف. ومن الممكن أيضاً فحص الأحافير الدقيقة لنرى ما إذا كانت تحتوي على كربون عضويّ.

توجد أقدم الأحافير الدقيقة التي لا جدال فيها في جنوب أفريقيا، ويرجع عُمرها إلى 55.2 مليار سنة. وهي مُقْنِعَة إذ عُثِرَ عليها في الحصائر الأحفورية لفتائل تحوي كربوناً عضوياً وتضمّ بعض الأشكال الميكروبية التي استُوقِفت أثناء عملية انقسام الخلايا. ومن المحتمل وجود أحافير دقيقة أقدم في جنوب أفريقيا تتراوح أعمارها ما بين 2.3 و5.3 مليار سنة، وهي كرويَّة الشكل وتحوي كربوناً عضوياً، ويبدو أنها تظهر انقساماً خلويّاً، لكنها لا تتسم بسمات بيولوجية أخرى. وثمَّة مستعمرات لأحافير دقيقة شبيهة موجودة داخل أحجار رملية يرجع عُمرها إلى 4.3 مليار سنة في تكوين ستريلي بول (Strelley Pool) في شمال غرب أستراليا، وتحوي أيضاً كربوناً عضوياً يتمتع بنظائر مميّزة لأشكال الحياة.

توجد الأحافير الدقيقة الأكثر إثارةً للجدل في العالم كله في التكوين الصخري آبِكس شيرت (Apex Chert) في شمال غرب أستراليا، ويبلغ عُمره 3.5 مليار سنة. ولقد عرَّف بيل شوب (Bill Schopf) الأستاذ في جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس، تلك الأحافير في تسعينيات القرن العشرين بأنها «أقدم أحافير دقيقة في العالم». وتبدو بِنى الأحافير أشبه بأشرطة تتدرّج ما بين اللونين الأسود والبني القاتم، ويظهر أنها مُقسَّمَة إلى قطاعات شبيهة بالخلايا. ولقد خلع شوب عليها أسماءً لاتينية، مشيراً إلى أنها بكتيريا زرقاء مُنقرضة، وهي بكتيريا تخليق ضوئي. وفي عام 2002، نشب نزاع شرس عندما أعاد مارتن براسير (Martin Brasier) من جامعة أكسفورد فحص العيّنات، وأثبت أنها لا تبدو شبيهة بالفتائل الميكروبية في صورتها ذات الأبعاد الثلاثية. ولاحظ براسير أيضاً أن صخور الشيرتالم كلها في التكوين الصخري «آبيكس تشيرت» لا تتسم بسمات بيولوجية أخرى. الرسوبية لم تكن رسوبية، وإنما كانت نوعاً يُنتج في المنافذ المائية الحرارية، وهو المكان المُستبعد لوجود البكتيريا الزرقاء التي تحتاج إلى ضوء الشمس. ومنذ ذلك الحين، كشفت المزيد من الاستقصاءات عن أن الفتائل هي في واقع الأمر شقوق مملوءة جزئياً بأكسيد الحديد الأحمر (الهيماتيت) الذي يصبغها باللون الداكن. ومع ذلك، فإن الكربون العضويّ يتناثر في صخور الشيرت خارج الفتائل، وما زال الجدل دائراً.

ناقشنا إلى الآن النظائر والأحافير الدقيقة وصخور الستروماتوليت. ومن بين المؤشّرات المحتملة الأخرى على الحياة البدائية الواسمات الحيوية (biomarkers)، وهي مُشتقات من الجزيئات البيولوجية يُمكن تمييزها. إننا جميعاً نَألف فكرة أن الهياكل العظمية الأحفورية تسمح لنا بالتعرّف على التيرانوصور ركس، أو الديناصور الثُّلاثيُّ القُرون (Triceratops). وعلى المقياس المجهريّ، يمكن أن تُخلِّف الميكروبات وراءها بقايا جزيئات عضوية مُفردة، تتألف من حلقات أو سلاسل هيكليَّة من ذرات الكربون. وهذه «الأعمدة الفقرية الجزيئية» تنشأ من جزيئات محدّدة توجد

فقط في أنواع بعينها من الميكروبات. ومن ثم، فإن الواسمات الحيوية لا تؤكِّد وحسب وجود الحياة السابقة، بل في وسعها أيضاً إظهار أشكال محددة من الحياة.

ومن سوء الطالع أن الواسمات الحيوية العتيقة، شأنها شأن بعض الأحافير الدقيقة، يشوبها الجدل هي الأخرى. فأقدم الواسمات الحيوية المُسجَّلَة ترجع إلى نحو 2.8 مليار سنة، ويبدو أنها تُظْهِر جزيئات توحي بوجود بكتيريا زرقاء مُنتِجة للأكسجين. لكن عيّنات الصخور المجموعة ربما تلوثَّت بفعل مادة عضوية أصغر عُمراً. وعُثِرَ على واسمات حيوية أكثر موثوقية في صخور يرجع عُمرها إلى 2.5 مليار سنة داخل مُكتنفات الموائع الدقيقة التي تظهر غير ملوَّثَة.

ورغم القيود التي تشوب بعض الأدلة، فإن السجل الكامل يُظهر أن الأرض كانت مأهولة منذ 3.5 مليار سنة، أي بعد مليار سنة من تَكوُّنها، وبعد فترة وجيزة من انتهاء حقبة القصف الشديد، ما يوحي بأن الحياة ربما تنشأ بسرعة إلى حدّ ما على مقاييس زمنية جيولوجية على كواكب مناسبة. وهذا يعني أنه ليس من المستبعد تماماً أنّ كوكب المريخ الذي نعتقد أنه شَهِدَ فترة قابلية للسكنى قصيرة جيولوجيّاً (الفصل السادس) ربما يحوي أيضاً أشكالَ حياة متطوّرة.

الفصل الرابع من الوحل إلى السموّ

الفصل الرابع
من الوحل إلى السموّ

كيف حافظت الأرض على بيئة مناسبة للحياة؟

بغض النظر عن الطريقة التي بدأت بها الحياة، فإنها بمجرد أن ترسّخت وضربت بجذورها في الأرض، استمرت لما يربو على 3.5 مليار سنة، وتطوّرت من الوحل الميكروبي إلى رُقيّ الحضارة البشرية. وحافظت الأرض خلال تلك الفترة على المحيطات، وظلّ مناخها معتدلاً غالباً، رغم أنه كانت هناك زيادة بنسبة 25% في كمية ضوء الشمس. إن السطوع التدريجيّ للشمس هو النتيجة التي ترتّبها طريقة شروق الشمس على التسلسل الأساسي. فعندما تندمج أربع ذرات هيدروجين في نواة هيليوم واحدة في لُب الشمس، يقلُّ عدد الجُسيمات، ومن ثمّ فإن المادة التي تعلو اللُّب تمارس ضغوطاً نحو الداخل لسدّ الفراغ المتاح. ويَسْخَن اللُّب المضغوط، ما يؤدي إلى تسارع تفاعلات الاندماج بحيث تسطع الشمس بقدر زائد بنسبة تتراوح بين 7% و9% كل مليار سنة. وتؤكّد هذه النظرية مشاهدات النجوم الشبيهة بالشمس في مراحل عُمرية مختلفة.

لو كان مناخ الأرض الآن هو مناخها منذ ملياريْ سنة أو أكثر، لكان الكوكب بأسره متجمداً تحت أشعة الشمس الأوهن، لكن الأدلة الجيولوجية توحي بنقيض ذلك. ويكمن هذا اللُّغز فيما يُعرف باسم «معضلة الشمس الشابة الخافتة» (faint young Sun paradox). فثمة أدلة على وجود الماء السائل قبل 3.8 مليار سنة على الأقل، وتشمل مثلاً وجود الصخور الرسوبية التي تشكّلت عندما جرف الماء الموادَّ من القارات إلى المحيطات.

وهناك ثلاث طرائق لحل معضلة الشمس الشابة الخافتة. فالحل الأرجح على الإطلاق ينطوي على مفعول أعظم للدفيئة في الماضي. وثمَّة اقتراح آخر مفاده أن الأرض العتيقة بأكملها كانت أدكن مما هي عليه اليوم، وامتصت كميات كبرى من ضوء الشمس، رغم ندرة الأدلة التي تدعم هذا المقترح. والفكرة الثالثة تفيد بأن الشمس الشابة طرحت مواد كثيرة في تدفّق سريع (رياح شمسية) إلى الفضاء، بحيث لم يكن لُب الشمس مضغوطاً وساخناً جداً بمرور الوقت بفعل ثِقلها الجاثم عليها كما

افترضنا أعلاه. ولو كان الفقد في الكتلة بالكميات الصحيحة تماماً، لكانت الشمس قد بدأت حياتها ساطعةً سطوعها التي هي عليه اليوم. لكن مشاهدات النجوم الشبيهة بالشمس حالياً لا تدعم الفرضية الثالثة.

عند النظر في الفكرة الأولى، علينا تقدير فكرة أن الغلاف الجوي يُسَخِّن الأرض نوعاً ما، الأمر الذي يرتهن بتركيبة الغلاف الجوي. فمن دون غلاف جوي (وعلى فرض أن كمية ضوء الشمس التي تعكسها الأرض ظلَّت ثابتة بلا تغيُّر)، سيكون سطح الأرض قارس البرودة، إذ تنخفض حرارته إلى -18 درجة مئوية. لكن بدلاً من ذلك، نجد أن متوسط درجة حرارة سطح الأرض العالمية +15 درجة مئوية. والفارق المُقدَّر بـ 33 درجة مئوية (18+15) هو حجم مفعول الدفيئة على الأرض، وهو الدفء الناجم عن الغلاف الجوي.

كيف يحدث مفعول الدفيئة؟ يَسْخَن سطح الكوكب بفعل ضوء الشمس المرئي، ما يؤدي إلى توهّجه بالأشعة تحت الحمراء، مثلما يتوهّج جسدك الدافئ عند هذه الأطوال الموجيَّة. والغلاف الجوي غالباً ما يكون مُعتماً لا يسمح بنفاذ الأشعة تحت الحمراء القادمة من السطح أسفل منه، ومن ثمّ فإنه يمتص طاقة الأشعة تحت الحمراء ويَسْخَن. ونظراً لأن الغلاف الجوي ساخن، فإنه يشع أيضاً في نطاق الأشعة تحت الحمراء. وبعض هذه الأشعة من الغلاف الجوي ترتَّدُ إلى سطح الكوكب. ومن ثم يزداد سطح الكوكب دفئاً بأكثر مما ينبغي له في غياب الغلاف الجوي، لأنه يتلقى طاقة من الغلاف الجوي الساخن إضافةً إلى ضوء الشمس المرئي.

عندما كان عُمر الأرض 3.5 مليار سنة، وكانت الشمس أضعف بنسبة 25%، كان الأمر يقتضي حدوث مفعول دفيئة بمقدار 50 درجة مئوية للحفاظ على متوسّط درجات الحرارة العالمي ذاته على الأرض، الذي نتمتع به الآن في ظل مفعول دفيئة بمقدار 33 درجة مئوية. وقد يزداد مفعول الدفيئة شدة، إن كانت هناك مستويات أكبر من غازات الدفيئة، وهي الغازات المسؤولة عن امتصاص الأشعة تحت الحمراء القادمة من سطح الأرض. واليوم، يُنسب إلى بخار الماء نحو ثلثي مفعول الدفيئة البالغة درجة حرارته 33 درجة مئوية، بينما يُنسب إلى ثاني أكسيد الكربون (CO_2) السواد الأعظم من الأثر المتبقي. ولكن، يتكثف بخار الماء على هيئة أمطار أو ثلج، ومن ثمّ فإن تركيزه أساساً هو ردة فعل لدرجة الحرارة الموجودة في الخلفية التي يحدّدها ثاني أكسيد الكربون الجويّ الذي لا يتكثّف. وبهذه الطريقة، يتحكم ثاني أكسيد الكربون اليوم في مفعول الدفيئة، رغم أن مستواه قليل. فقرابة عام 1700، كان هناك نحو 280 جزءاً لكل مليون من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للأرض (ما يعني أنه في كل مليون جزيء من الهواء، كان هناك 280 جزيئاً من ثاني أكسيد الكربون)، بينما في عام 2010 بلغت كمية ثاني أكسيد الكربون 390 جزءاً لكل مليون جزيء. ومنذ الثورة الصناعية، انبعث ثاني أكسيد الكربون من عملية إزالة الغابات وحرق الوقود الأحفوريّ بأنواعه، مثل النفط أو الفحم. وفي أواخر الدهر السحيق، استُنتج وجود حدٍّ أعلى لكمية ثاني أكسيد الكربون يبلغ عشرة أضعاف إلى مئة ضِعْف مستوى ما قبل الثورة الصناعية من التحليلات الكيميائية للتُرَب الرسوبية، وهي تُرَب أحفورية. ولكن، حتى مثل هذه المستويات من ثاني أكسيد الكربون لم تكن كافية لمواجهة معضلة الشمس الشابة الخافتة.

والواقع أن الغلاف الجوي للدهر السحيق كان يحوي أقل من جزءٍ واحد لكل مليون جزيء أكسجين (O_2)، ما يوحي بأن الميثان (CH_4) كان غازاً من غازات الدفيئة المهمة. واليوم، انخفض مستوى الميثان الجويّ حتى بلغ 1.8 جزء لكل مليون جزء، لأنه يتفاعل مع الأكسجين، وهو ثاني أكثر الغازات وفرةً في الهواء بنسبة 21%. (يتكون أغلب الهواء في عصرنا الحالي من النيتروجين (N_2)، إذ يُشكِّل 78% منه، لكن الأكسجين والنيتروجين ليسا من غازات الدفيئة). في الدهر السحيق، سمح نقص الأكسجين لميثان الغلاف الجوي بالوصول إلى مستوى آلاف الأجزاء لكل مليون. ولم يتراكم الميثان دون حدٍّ لأنه يمكن أن يَنْحل بفعل الأشعة فوق البنفسجية في طبقات الغلاف الجوي العليا. ويمكن أن تُنْتِج العمليات الكيميائية اللاحقة التي تنطوي على بقايا انحلال الميثان موادَ هيدروكربونية أخرى، أي مواد كيميائية مصنوعة من الهيدروجين والكربون، بما في ذلك غاز الإيثان (C_2H_6) وضباب دخانيّ من جُسيمات سخامية. وإن مزيجاً من الميثان والإيثان وثاني أكسيد الكربون - فضلاً عن بخار الماء الذي يتراكم استجابةً لدرجة الحرارة التي تحدّدها غازات الدفيئة غير القابلة للتكاثف - أتاح مفعول دفيئة كافياً لمعادلة أثر الشمس الأضعف. ويَفْتَرِض ذلك أنه كان هناك مصدر للميثان من الحياة الميكروبية، كما هو الحال الآن بالضبط، وهي الفرضية المُستساغة لأن الأيض لأغراض إنتاج الميثان قديم (انظر الفصل الخامس).

وبالطبع، يمكننا أن نستفسر عن النحو الذي كان عليه المناخ المبدئي للأرض قبل نشأة الحياة. في تلك الحالة، الأرجح أن غاز ثاني أكسيد الكربون تَحَكَّمَ في مفعول الدفيئة، كما هي الحال الآن. والواقع أنه خلال السواد الأعظم من تاريخ الأرض كانت هناك دورة جيولوجية لثاني أكسيد الكربون نظَّمَت المناخ على نطاقات زمنية امتدت زهاء مليون سنة. (وما زالت تلك الدورة سارية إلى الآن، لكنها أبطأ بكثير من أن تتصدى للاحترار العالمي الذي يسبّبه البشر). يتحلل ثاني أكسيد الكربون الجويّ أساساً في مياه الأمطار ويتفاعل مع صخور السيليكات في القارات. وبعد ذلك، ينتقل الكربون المحلول من هذه التجويَّة الكيميائية إلى الأنهار ومنها إلى المحيطات، حيث يؤول به المآل إلى الصخور في القاع، كما في الأحجار الجيرية المُكوَّنَة من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$). ولو كان تَرَسُّب الكربونات هو كل ما يحدث، لفقدت الأرض ثاني أكسيد الكربون الجويّ وتجمّدت، لكن هناك آلية تُعيد ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي. تُنقل كربونات قاع المحيطات إلى صفائح محيطيَّة تتحرك ببطءٍ وتهبط تحت صفائح أخرى في عملية تُعرف باسم «الاندساس الصفيحيّ». وثمَّةَ مثال اليوم على تلك العملية في صفيحة «نازكا» (Nazca) التكتونية الواقعة في المحيط الهادئ الجنوبي، وهي تنزلق شرقاً تحت تشيلي. تنضغط الكربونات وتسخن أثناء عملية الاندساس الصفيحيّ، ما يؤدي إلى تحلّلها إلى ثاني أكسيد الكربون. ويؤدي النشاط البركاني (حيث تنصهر الصخور) والتحوُّل (حيث تزداد حرارة الصخور وتنضغط لكنها لا تذوب) إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون. وتُعرف دورة فقدان ثاني أكسيد الكربون وتجدُّده كلها باسم دورة الكربونات-السيليكات الجيوكيميائية (carbonate-silicate geochemical cycle)، وتعمل عمل مُنَظِّم الحرارة. إذا ازداد المناخ حرارةً، فإن المزيد من الأمطار والتجوية الأسرع تستنفد غاز ثاني أكسيد الكربون وتُبرِّد الأرض. وإذا أمست الأرض باردةً، وكان معدل إزالة ثاني أكسيد الكربون من الهواء الجاف بطيئاً، فإن ثاني أكسيد الكربون يتراكم من الانبعاثات الجيولوجية، فيزيد من مفعول الدفيئة.

ربما تكون دورة الكربونات-السيليكات الجيوكيميائية قد نظّمت المناخ قبل بدء الحياة على الأرض. والأرجح أنها آنذاك أدت دوراً مهماً على نحو متزايد بوصفها منظماً للحرارة بعد أن تراجعت معدلات غاز الميثان المُتسبب في مفعول الدفيئة في خطوتيْن عندما زادت تركيزات الأكسجين الجويّ، أولاً منذ نحو 2.4 مليار سنة، ومرة أخرى منذ ما يتراوح بين 750 و580 مليون سنة.

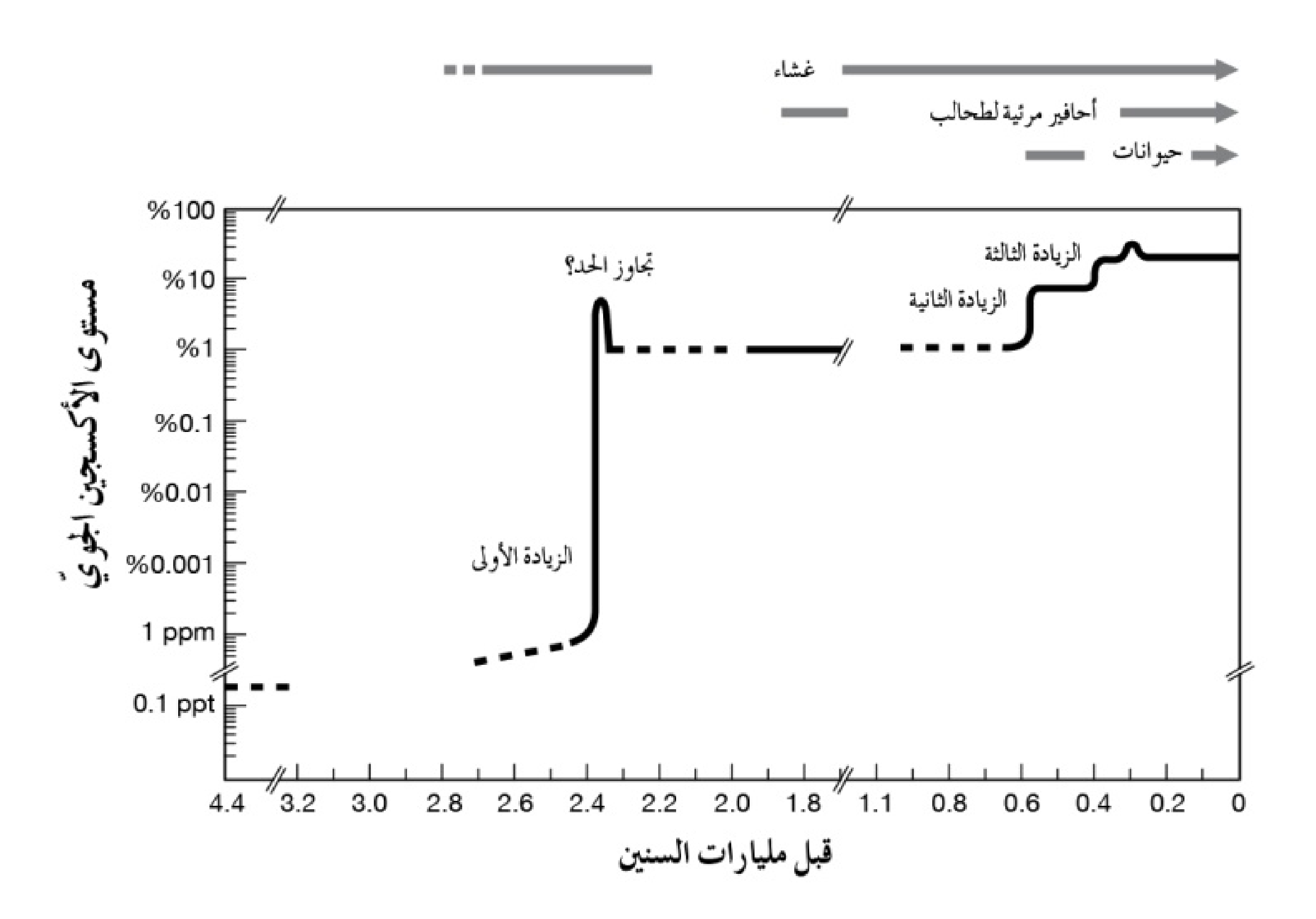
ثمة تنبيه مفاده أن هذه الدورة ربما كانت تعمل بشكل مختلف في الدهر الجهنمي، وربما في الدهر السحيق، لأن الصفائح التكتونية - وتحديداً الحركة الواسعة النطاق للصفائح الجيولوجية التي ترتقي خلايا الحمْل الحراري داخل طبقة الوشاح أدناه - ربما كان لها أسلوب مختلف. تنتج العناصر المُشعة في طبقة الوشاح حرارةً عندما تضمحلّ، وكان المزيد منها يضمحلّ خلال بدايات نشأة الأرض. لذا، من المفترض، من ناحية، أن تسمح طبقة الوشاح السحيقة الأكثر سخونة والأقل صلابة للقشرة المُحيطيَّة بالغرق بسرعة أكبر. ومن ناحية أخرى، كان ينبغي لطبقة الوشاح الأكثر سخونة أن تنتج قشرة محيطية أكثر ذوباناً وسُمْكاً وحرارة وأقل عرضة للاندساس. ومجمل القول إن وجود صخور الجرانيت المُستخلصة من أحجار الزركون (الفصل الثالث) يوحي بأن القشرة الأرضية لا بد أنها دُفِنَت بطريقة ما، لأن الجرانيت ينتج عندما تذوب القشرة الغارقة. ومع ذلك، ما زالت الطريقة التي كانت تعمل بها الصفائح التكتونية على الأرض في مراحل تكوّنها الأولى قيد البحث والنقاش.

حدث الأكسدة العظيم: خطوة نحو الحياة المُعَقَّدَة

كانت أبرز التغيرات التي طرأت على تركيبة الغلاف الجوي للأرض عبارة عن زيادات في كمية الأكسجين التي لم تكن تقل أهمية لتطور أشكال الحياة عن التنويعات في غازات الاحتباس الحراري. خلال القسم الأكبر من تاريخ الأرض، كانت مستويات الأكسجين منخفضة جداً لدرجة أن وجود الحيوانات المُستنشقة للأكسجين كان مستحيلاً. ووقع حدث الأكسدة العظيم عندما ضُخَّ الأكسجين أول مرة في الغلاف الجوي منذ ما يتراوح بين 2.4 و2.3 مليار سنة. ومع ذلك، وصلت مستويات الأكسجين إلى ما بين 0.2% و2% فقط من حيث الحجم وليس 21%، وهي النسبة التي هو عليها الآن. وحيل من دون ظهور الحيوانات الضخمة حتى 580 مليون سنة تقريباً من عُمر الأرض، بعد أن زادت مستويات الأكسجين مرة ثانية، مُتجاوزةً 3% (الشكل 3).

إن الأكسجين الجويّ (O_2) كله تقريباً حيويّ. وكمية محدودة جداً منه نتجت من دون حياة عندما فكّكت الأشعة فوق البنفسجية جزيئات بخار الماء (H_2O) في الغلاف الجوي العلوي، فتسببت في أن تحرِّر تلك الجزيئات الهيدروجين. ويُترك الأكسجين الخالص عندما يفرُّ الهيدروجين إلى الفضاء، فيحول بذلك من دون إعادة تكوُّن الماء. لكن إنتاج الأكسجين غير الحيويّ محدود لأن الغلاف الجوي العلوي جافّ. وبدلاً من ذلك، فإن المصدر الأساسي للأكسجين هو عملية التخليق الضوئي الأكسجينيّ التي تستخدم فيها النباتات الخضراء والطحالب والبكتيريا الزرقاء أشعة الشمس لتفكيك الماء إلى هيدروجين وأكسجين. هذه الكائنات الحية تخلط الهيدروجين بثاني أكسيد الكربون كي تصنع المادة العضوية، وينبعث منها الأكسجين على هيئة نفاية.

وهناك نوع آخر أكثر بدائية من التخليق الضوئي الميكروبيّ لا يُفكّك الماء أو يُطلق الأكسجين، ألا وهو التخليق الضوئي غير المؤكسج. وفي هذه الحالة، تُصنع الكتلة الحيوية باستخدام



3. التاريخ التقريبيّ للأكسجين الجوي استناداً إلى الأدلة العلمية (ppm = جزء لكل مليون؛ ppt = جزء لكل تريليون).

ضوء الشمس والهيدروجين أو كبريتيد الهيدروجين أو الحديد المُذاب في المناطق الحرارية المائية المحيطة بالبراكين. واليوم، ينمو الخَبَثُ الميكروبيّ بهذه الطريقة في المنابع الحارّة.

قبل أن تتطوّر النباتات والطحالب، كانت الكائنات الحية المُنتِجَة للأكسجين شبيهة بالبكتيريا الزرقاء الحديثة. والبكتيريا الزرقاء هي بكتيريا خضراء ضاربة إلى الزُّرقة تحتشد في محيطاتنا وبحيراتنا اليوم. ولقد أظهرت دراسات الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (الدنا) أن الميكروبات

الشبيهة بالبكتيريا الزرقاء كانت سلفاً للنباتات والطحالب والبكتيريا الزرقاء الحديثة. ومن ثم، يجوز أن نفترض أن الغلاف الجوي أمسى مُؤكسجاً فور تطوّر البكتيريا الزرقاء. غير أن هناك أدلة توحي بأن البكتيريا الزرقاء كانت تنتج الأكسجين قبل أن ينتشر في الغلاف الجوي بفترة طويلة جداً.
وهناك تفسير منطقي مفاده أن المواد الاختزالية (reductants)، وهي مواد كيميائية تستهلك الأكسجين، استنفدت الأكسجين بسرعة في البداية. وتتضمن المواد الاختزالية غازات مثل الهيدروجين وأول أكسيد الكربون والميثان النابعة من البراكين ومناطق الحرارة الجوفية ومنافذ قاع البحر. وتُظهر الصخور الرسوبية المميّزة الغنية بالحديد، وتُعرف باسم «تكوينات الحديد الحزاميَّة» وترجع إلى الدهر السحيق، أنه كانت هناك كميات كبيرة من الحديد المُذاب في المحيط السحيق، خلافاً لمحيطات العصر الحالي، التي ربما تفاعلت مع الأكسجين.

ظهرت المؤشّرات الأولى على الأكسجين المصنوع عن طريق التخليق الضوئي قبل ما يتراوح بين 2.7 و2.8 مليار سنة، بحسب الأدلة المُستخلصة من صخور الستروماتوليت ووجود المواد الكيميائية التي أمست قابلة للذوبان بالتفاعل مع الأكسجين. وفي شمال غرب أستراليا، أحاطت صخور ستروماتوليت موجودة داخل صخور تُعرف باسم «تكوين تومبيانا» (Tumbiana Formation) بالبحيرات العتيقة. من الناحية النظرية، ربما بَنَت الميكروبات صخور الستروماتوليت تلك باستخدام التخليق الضوئي اللاأكسجينيّ، ولكن لا توجد أدلة على الانبعاثات المائية الحرارية الضرورية لهذا الأيض. والواقع أن البكتيريا الزرقاء التي استخدمت التخليق الضوئي الأكسجينيّ ربما أنشأت صخور الستروماتوليت بما يتماشى مع الخيوط الشعرية والقِمم في صخور الستروماتوليت التي تنشأ عندما تنزلق فتائل البكتيريا الزرقاء نحو ضوء الشمس. علاوة على ذلك، أصبح المُولِيبْدنُوم والكبريت، وهما عنصران يذوبان فقط عند تفاعلهما مع الأكسجين، مُركَّزين في رواسب قاع البحر بعد مرور 2.8 مليار سنة على نشأة الأرض حتى وصلا إلى مستويات تكون ممكنة إذا قامت الميكروبات بأكسدة هذين العنصرين على الأرض باستخدام مصادر محلية للأكسجين، مثل صخور الستروماتوليت.

وثمة سبب آخر يعلّل عدم تراكم الأكسجين على الفور في الغلاف الجوي للأرض، وهو أن إنتاجه عملية صفريَّة المُحصِّلَة في الأعم الأغلب. عندما يُصنع جزيء الأكسجين، ينتج جزيء مصاحب من الكربون العضوي، كما سنوجز في المعادلة التالية:

ثاني أكسيد الكربون + ماء + ضوء الشمس = مادة عضوية + أكسجين

$$CO_2 + H_2O + \text{sunlight} = CH_2O + O_2$$

وتنعكس هذه العملية بسهولة شديدة؛ أي أن المادة العضوية تتفاعل مع الأكسجين لتنتج ثاني أكسيد الكربون والماء. فضلاً عن ذلك، فقد كان نقص الأكسجين في الغلاف الجوي للدهر السحيق يعني

أن الميكروبات كان في وسعها تحويل الكربون العضوي إلى غاز الميثان بسهولة ويسر، بالضبط كما يحدث الآن في ترسيبات البحيرات أو قيعان البحار المُنتنة والخالية من الأكسجين. وفي الهواء، كان في وسع الميثان التفاعل مع الأكسجين بغية إعادة إنتاج بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. وفي كلتا الحالتين - أي الانعكاس المباشر أو الإبطال غير المباشر بالميثان - لا ينتج الأكسجين الخالص، رغم وجود ظاهرة التخليق الضوئي.

ومع ذلك، ثمَّة جزء طفيف جداً (تُقدَّر نسبته حالياً بـ 0.2%) من الكربون العضوي دفينٌ في المواد الرسوبية ومنفصل عن الأكسجين يحول من دون إعادة امتزاج الاثنين. وكل كربون عضوي يُدفن يُعادل جزيئاً خالصاً من الأكسجين المتحرّر. وبالطبع، وُجِدَ أن هذا الأكسجين «المُحرَّر» يمكن أن يتفاعل بسهولة مع العديد من المواد الأخرى إلى جانب الكربون العضوي، بما في ذلك الغازات الجيولوجية والمعادن المُذابة، مثل الحديد. ومع ذلك، حانت نقطة التحوّل عندما تراجع تدفّق المواد المُختزِلة إلى الغلاف الجوي إلى ما دون التدفّق الخالص للأكسجين المرتبط بدفن الكربون العضوي، ما أفضى إلى وقوع حدث الأكسدة العظيم. وفي فترة لاحقة، بلغ الأكسجين مرحلة مستقرة تراوحت بين 0.2% و2% على الأرجح، لأن الأكسجين الذي انحلّ في مياه الأمطار تَفَاعَلَ بشدةٍ مع المواد المعدنية القاريَّة، ما حال دول تراكمه بقدر أكبر.

في الواقع، إن الارتفاع المفاجئ في الأكسجة دليل على حدث الأكسدة العظيم. ولقد ظهرت «قيعان حمراء»، وهي أسطح قاريَّة مُصطبِغَة بلون الصدأ تنشأ عندما تتفاعل معادن الحديد مع الأكسجين. واليوم، أمست الأسطح الأرضية المائلة للون الأحمر شائعة، كما في جنوب غرب أمريكا. ولقد حدث أيضاً تغير في معالجة الكبريت في الغلاف الجوي. وقبل حدث الأكسدة العظيم، عندما كان هناك أقل من جزء واحد لكل مليون جزء من الأكسجين الجويّ، تساقطت جّسيمات حمراء وصفراء من الكبريت الأوليّ حَرفيّاً من السماء. وتشكَّلت هذه الجّسيمات في التفاعلات الكيميائية على ارتفاع عدة كيلومترات عندما كان غاز ثاني أكسيد الكبريت المنبعث من البراكين ينحلّ بفعل الأشعة فوق البنفسجية. وحملت جُسيمات الكبريت المُتساقطة تركيبة نظير الكبريت إلى الصخور التي تشير إلى التكوين الجوي. وبعد حدث الأكسدة العظيم، امتزج الأكسجين بالكبريت الجويّ، فمنع الجسيمات الأولية من التشكُّل. وأمست السماء صافية وتلاشت بصمة النظير من الصخور الرسوبية.

ومع وقوع حدث الأكسدة العظيم، تَكوَّنَ أوزون طبقة الستراتوسفير. هذه المنطقة التي تحوي الأوزون المُركَّز وتقع على بُعد يتراوح بين 20 و30 كم من سطح الأرض تقي من الأشعة فوق البنفسجية الضارّة. ولولا طبقة الأوزون، لتعرّضنا لحروق شمسية بشعة في عشر ثوانٍ. والأوزون جزيء يتكوّن من ثلاث ذرات أكسجين (O_3) وينشأ من الأكسجين. ينقسم جزيء الأكسجين (O_2) بفعل أشعة الشمس إلى ذرّات أكسجين (O) تمتزج بعد ذلك بجزيئات أكسجين (O_2) لتكوِّن الأوزون (O_3).

ما زال سبب حدث الأكسدة العظيم محل نقاش وجدل، لكن لا بد أنه يرجع إلى زيادةٍ عالمية في إنتاج الأكسجين من المزيد من عمليات الدفن الأكسجينيّ أو تراجعٍ في استهلاك الأكسجين. والمشكلة التي تعيب الفكرة الأولى أن المادة العضوية تستخلص نظَير الكربون الخفيف -

الكربون-12 - من مياه البحار، لكن كربون مياه البحار، المُسجَّل في الصخور الجيرية العتيقة، لا يتناقص بشكل ثابت في محتوى الكربون-12. وبذلك تتبقى لنا الفكرة الثانية.

ولكن، ما الذي تسبب في تراجع تدفق المواد المُختزِلَة؟ من بين الاحتمالات المقترحة أن الوفرة الكبيرة نسبياً في الغازات الحاملة للهيدروجين، مثل الميثان والهيدروجين (اللذين لا غنى عنهما في غلاف جوي يخلو من الأكسجين) تعني أن الهيدروجين فَرَّ سريعاً من الغلاف الجوي العلوي إلى الفضاء. وأدى فقدان الهيدروجين إلى أكسدة الكوكب الصلب. وتحتوي الصخور المُؤَكسَدَة على مواد مُختزِلَة أقل، ومن ثمّ فقد أحبط ذلك تدريجياً انبعاث المواد المُختزِلَة. وتَحْدُث الأكسدة لأن في وسعك عموماً اقتفاء أثر الهيدروجين الهارب رجوعاً إلى مصدره في الماء (H_2O)، حتى لو اخترقت ذرات الهيدروجين وسيطي الميثان (CH_4) أو الهيدروجين (H_2). لذا عندما يفرّ الهيدروجين، يُترك الأكسجين وحده حيث نشأ الهيدروجين. ويعاني بخار الماء ذاته من مشكلة الوصول إلى طبقة الغلاف الجوي العلوية لأنه يتكثّف في السُّحُب، لكن الغازات الحاملة للهيدروجين، مثل الميثان، لا تتكثَّف وتساعد في تسلل الهيدروجين إلى الفضاء.

ثمة مثالٌ تقريبيّ على حدث الأكسدة العظيم هو معايرة حمض وقاعدة من النوع الذي يُجرى في المدارس الثانوية بسكب قطرات حمض في محلول قلويّ. فجأة، يتغيّر لون المحلول، إذ يتحول عادةً من محلول نقي صافٍ إلى آخر أحمر. لقد بلغ الغلاف الجوي العتيق مرحلة انتقالية مثيلة من الغِنَى بالهيدروجين إلى الغِنَى بالأكسجين. وبدلاً من القاعدة الحمضية، فإننا نُطْلِق على مثل هذه المعايرة اسم «معايرة الأكسدة والاختزال» (redox titration) لأنها مُنَافَسَة بين مواد مُختزِلَة مثل الهيدروجين ومواد مُؤَكسِدَة مثل الأكسجين.

مليار سنة باعثة على الضجر انتهت بنشأة حياة الحيوان

تكيّفت المحيطات واليابسة مع التغيّر الذي جلبه حدث الأكسدة العظيم، وقبل قرابة 1.8 مليار سنة، كان الأكسجين الجويّ قد استقر وظل يتأرجح بين نسبتيْ 0.2% و2% لفترة طويلة بشكلٍ مذهل. وكان التطوّر تجاه الحياة المُعقدة بطيئاً، ربما لأن المياه الخالية من الأكسجين التي كانت غنية بالحديد المُنحَل أو كبريتيد الهيدروجين استقرّت تحت سطح محيط مُؤَكسَج على نحو مُعتدل. وهذه الظروف المفتقرة إلى الأكسجين سامَّة للحياة المُعقدة. والواقع أن التطوّر كان وئيداً جداً حتى إنّ الفترة الفاصلة من عُمر الأرض بين 1.8 مليار سنة و0.8 مليار سنة مضت تُعرف باسم «المليار المُمِل» (boring billion). وبحسب أحد الأبحاث العلمية: «لم يحدث على مدار تاريخ الأرض أنْ وقعت أحداث محدودة جداً لكثير من الموجودات لفترة مديدة جداً»!

والواقع أن العديد من الأحداث البارزة وقعت في المليار المُمِل وقبله مباشرة. فقبل نحو 1.9 مليار سنة، ظهرت أول أحافير لكائنات منفردة منظورة بالعين المجردة. ومن المرجح أن تلك الآثار، وهي عبارة عن لفائف حلزونية يبلغ قطرها بضعة سنتيمترات (وتُعرف باسم غريبانيا Grypania)، كانت لأعشابٍ بحرية. وفي الصين، وُجِدَ نوع من الأحافير لكائن يُعرف باسم

أكريتارك (acritarchs) يزيد حجمه على 0.05 ملم وله جدران عضوية قبل 1.8 مليار سنة. ويُعتقد أن بعضها أكياس طحالب تتكوّن عندما تتحوّل الطحالب إلى كُرات خاملة أثناء فترات الجفاف. ونشأت سلالات جديدة أيضاً، بما في ذلك الطحالب الحمراء قبل 1.2 مليار سنة، كانت قادرة على التناسل الجنسي على الأرجح. واليوم نَغْلي أسلاف الطحالب الحمراء لنصنع الأغار الذي يُستخدم لزيادة كثافة المُثَلّجات، ونستخدم نوعاً آخر (من جنس الطحالب الحمراء)، ويُسمَّى «نوري» (nori)، لتغليف السوشي. ونظراً لاكتشاف التناسل الجنسي، لم تكن المليار سنة المملة بذاك القدر من الملل حقاً.

ومنذ 750 مليون سنة تقريباً، وصولاً إلى مرحلة الذروة بعد عدة تقلّبات منذ نحو 580 مليون سنة، ارتفع مستوى الأكسجين للمرة الثانية إلى مستويات تجاوزت 3%، وأمست البحار العميقة مُؤَكسجَة بالكامل. وتَرجع الواسمات الحيوية الحيوانية والأحافير الصغيرة (ربما للإسفنجيات) إلى 630 ميلون سنة ماضية. لكننا لم نعثر على أحافير مُعقَّدَة سوى قبل 580 مليون سنة تتراوح أطوالها بين بضعة سنتيمترات إلى بضعة أمتار. كانت هذه كائناتٍ حية غريبة ورخوة البدن لا أفواه لها ولا عضلات، ولا بد أنها اعتمدت على توزيع المواد الغذائية عبر جِلْدها. وكان بعضها يشبه البيتزا، بينما يبدو بعضها الآخر أقرب إلى سَعَف النباتات. ومع ذلك، فقد عاشت تلك الكائنات الحية في أعماق سحيقة في البحار تحول من دون وصول ضوء الشمس إليها، ومن ثمّ يستحيل أنها كانت نباتات. وتُعرف تلك الكائنات إجمالاً باسم الحيويات الإدياكارية (Ediacaran biota) لأنها حدّدت بوضوح لأول مرة في التلال الإدياكارية في جنوب أستراليا. عاشت والحيويات الإدياكاريّة عشرات الملايين من السنين قبل أن تفنى وتندثر.

وبعد ذلك، حدث الانفجار الكمبريّ (Cambrian Explosion)، وهو الظهور السريع نسبياً لأحافير الحيوانات ذات البنى الجسدية الجديدة، في فترة فاصلة تراوحت ما بين 10 ملايين و30 مليون سنة بعد بداية العصر الكمبريّ قبل 541 مليون سنة. وظهر ممثّلون لغالبية المجموعة الحديثة للحيوانات، بما في ذلك العديد من الهياكل العظمية الصلبة. بدأ العصر الكمبريّ بعد نهاية «دهر الطلائع» (Proterozoic Aeon) مباشرةً، ويمثل أول حقبة من حقب «دهر الحياة الظاهرة» (Phanerozoic Aeon، قبل 541 مليون سنة حتى وقتنا الحاضر). وكلمة «Phanerozoic» تعني «الحيوانات الظاهرة»، وهي مشتُقَّة من الكلمتَيْن اليونانيتين «phaneros» (بمعنى «مرئي») و«zoion» (بمعنى «حيوان»). وثمة مخلوق دقيق من العصر الكمبري - يُعرف باسم «بيكايا» (Pikaia) - يشبه دودة سابحة ويبلغ طوله بضعة سنتيمترات. كان «بيكايا» على الأرجح ضمن مجموعة تطوّرت منها جميع الفقاريات، بما في ذلك البشر.

سمح الارتفاع الثاني لمستوى الأكسجين بنشأة التنوّع الحيواني، لكن سببه ما زال مجهولاً. وتتضمّن المقترحات التي تفسّر ذلك دَفْن الكربون العضوي (ومن ثمّ إنتاج الأكسجين) الذي تسارع بفعل العديد من العوامل. وكانت تلك العوامل الحياة الجديدة على الأرض التي عزّزت انحلال الأسطح وانطلاق المواد المُغذية، وتطوّر العوالق الحيوية البحرية، والإنتاج المُحسَّن للطين الذي ساعد في دفن المادة العضوية. وبدلاً من ذلك، ربما تكون المستويات المعتدلة البالغة نحو 100 جزء لكل مليون من الميثان الجويّ طوال «المليار المملّ» قد عزّزت فرار الهيدروجين بقدرٍ أكبر إلى

الفضاء، ما أكسَدَ قاع البحر وسمح بزيادة في الأكسجين بعد معايرة الأكسدة والاختزال العالمية الثانية.

وقبل نحو 400 مليون سنة، حدث ارتفاع ثالث في مستوى الأكسجين عندما استعمرت النباتات الوعائية القارّات. تلك النباتات لديها أنسجة خاصة (مثل الخشب) لنقل الماء والمواد المعدنية. والأرجح أنها حسَّنَت إطلاق المواد المُغذيَّة (باختراق سطح الأرض بالجذور) والدفن العضوي. وفي فترة لاحقة، ظلت مستويات الأكسجين الجوي تتراوح بين 10% و30%، ما سمح بصمود الحيوانات وأفضى في نهاية المطاف إلى نشأتنا.

كرة أرضية جليدية أم أرض ذات حزام مائي؟

من المثير للفضول أن الفترات الجليدية في شتى أنحاء العالم ترتبط بحدث الأكسدة العظيم والارتفاع الثاني في مستوى الأكسجين، وكأنهما مَسَانِد كتب تحيط بحقبة «المليار المملّ». ويرى بعض العلماء أنه في تلك العصور كانت محيطات الأرض كلها مغطاة بالجليد فيما يُعرف باسم «الكرة الأرضية الجليدية». لقد كانت تلك الحالة أكثر حدّة وأشد وطأة من العصور الجليدية التي حدثت خلال ملايين السنين القليلة الماضية التي امتدت إلى منطقة خطوط العرض الوسطى لا المناطق الاستوائية.
ولِنضعَ الأمور في سياقها نقول إن دهر الطلائع ينقسم إلى ثلاث حقب: حقبة الطلائع القديمة (Palaeoproterozoic، من 2.5 إلى 1.6 مليار سنة) وحقبة الطلائع الوسطى (Mesoproterozoic، من 1.6 إلى 1 مليار سنة) وحقبة الطلائع الحديثة Neoproterozoic، من مليار سنة إلى 541 مليون سنة). وعادةً ما يتحدث علماء الجيولوجيا عن «الفترات الجليدية لحقبة الطلائع القديمة» ليَصِفوا ثلاثَ أو أربعَ فترات جليدية وقَعَت في بداية تلك الحقبة (منذ ما يتراوح بين 2.45 و2.22 مليار سنة)، بينما تشير «الفترات الجليدية لحقبة الطلائع الحديثة» إلى فترتين جليديتيْن كبيرتين (الأولى قبل 715 مليون سنة والثانية قبل 635 مليون سنة) وفترة جليدية صغيرة (قبل 582 مليون سنة).

يقدِّم سِجلُّ الصخور دليلاً على تلك الفترات الجليدية العالمية. فتدفّق الصفائح الجليدية يخلط الصخور والرمال والوحل في نوع من الصخور يُعرف باسم «الحَتات الجليديّ» (tillite). وتترك الأنهار الجليدية أيضاً علامات احتكاك متوازية تُعرف باسم «الحزوز الجليدية» (striations) على الصخور الدفينة. علاوة على ذلك، تسقط الصخور من الجبال الجليدية أو الجروف الجليدية الذائبة، وينتهي بها الحال إلى الأسفل على هيئة أحجار متساقطة تُشوِّه القيعان الرسوبية. ويُمثِّل الحتات الجليدي والحزوز الجليدية والأحجار المتساقطة معاً دلائل واضحة وضوح الشمس على أن الصفائح الجليدية كانت موجودة في فترة من الفترات.

أثبتت القياسات المغناطيسية التي أُجريت في الثمانينيات والتسعينيات أيضاً أنّ الفترات الجليدية امتدت إلى المناطق الاستوائية. وتُظهر البوصلة المجال المغناطيسي الشمالي-الجنوبي للأرض. لكن الأقلّ وضوحاً هو أنّ خطوط المجال المغناطيسي تكاد تكون متعامدة على السطح على مقربة من

القطبين وبالتوازي مع السطح على مقربة من خط الاستواء. وتحوي الصخور البركانية معادنَ الحديد، مثل أكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4)، التي تتمغنط في اتجاه المجال المغناطيسي السائد عندما تبرد. وهكذا عندما تتوازى خطوط المجال المغناطيسي الحبيسة أو المتبقية مع القيعان القديمة للصخور، نعرف أن الصخور تشكّلت في المناطق الاستوائية. ولقد اكتُشفت هذه الظاهرة في الصخور المرتبطة بالفترات الجليدية لحقبة الطلائع القديمة وحقبة الطلائع الحديثة.

نشأت فكرة أنّ الأرض برمتها ربما تتجمّد بالكامل لو وصل الجليد البحري إلى المناطق الاستوائية في ستينيات القرن العشرين. فقد قدَّرَ عالم مناخ روسي يُدعى ميخائيل بوديكو (Mikhail Budyko) أنه لو امتدت القلنسوتين الجليديتين القطبيتين نحو خط الاستواء إلى أكثر من خط عَرْض 30 درجة، فمن المفترض أن تتجمّد الأرض كلها. فالجليد يعكس كمية كبيرة من أشعة الشمس، ومن ثمّ فإنه يتمتع بوضاءة (albedo) عالية، وهي الكسر (بين 0 و1) المنعكس. اليوم، تبلغ وضاءة الأرض نحو 0.3، ما يعني أن 30% من أشعة الشمس تنعكس عائدةً إلى الفضاء. لكن الجليد البحري يعكس 50% من أشعة الشمس عندما يكون عارياً، أو 70% إن كان مغطى بالثلوج. وتحدث ظاهرة انفلات وضاءة الجليد (ice-albedo runaway) عندما يجعل الجليد العالي الوضاءة في المنطقة الاستوائية الأرض تمتص نسبة أقل من ضوء الشمس وتبرد، ما يخلق المزيد من الجليد الذي يجعل الأرض أكثر برودة من ذي قبل، وهكذا دواليك. وتتكوّن الكرة الأرضية المُتجمدة عندما تصل درجة حرارتها في المتوسط إلى ما دون -35 درجة مئوية، ويبلغ سُمك الجليد فيها 1.5 كم عند خط الاستواء و3 كم عند القطبيْن.

طرح جوزيف كيرسشفينك (Joseph (Joe) Kirschvink)، من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، اقتراحاً حول كيفية ذوبان الكرة الأرضية الجليدية، وتناول فيه أيضاً عِبارة «الكرة الأرضية الجليدية» ذاتها بالتفسير. فقد افترض أن البراكين ستثقب الجليد وتبث ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ونظراً لأنه لن تكون هناك أمطار أو محيط مكشوف كبير لتفكيك ثاني أكسيد الكربون، فإنه سيتراكم على مدار بضعة ملايين من السنين حتى يُذيب مفعول الدفيئة المعزّز الكرة الأرضية الجليدية. فضلاً عن ذلك، فمن المفترض أن يحمل تدفّق الجليد من جليد القطبين السميك إلى الجليد الاستوائي الرقيق الرمادَ البركانيَّ والغبار الذي تثيره الرياح بحيث تصبح المنطقة الاستوائية أكثر دكنة، فتجعل كرة الجليد عُرضةً للذوبان. وبعد ذلك، تنعكس ظاهرة انفلات وضاءة الجليد: تراجع الجليد يجعل الأرض أكثر دفئاً، الأمر الذي يؤدي إلى إذابة المزيد من الجليد، وهكذا دواليك.

وربما تستقر طبقات من صخور الكربونات، تُعرف باسم «غطاء الكربونات»، فوق الرواسب الجليدية لتشهد على هذه التداعيات للكرة الأرضية الجليدية. والفكرة تنحصر في أنه بعد ذوبان الجليد، تتحوّل كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون إلى غطاء كربونات. ويَذْكر أنصار فرضية الكرة الأرضية الجليدية أن نسبة نظيرَي الكربون-12 والكربون-13 في الكربونات شبيهة بنظيرتها في ثاني أكسيد الكربون البركاني.

ثمة مشكلة محورية تعيب فرضية الكرة الأرضية الجليدية وهي كيف عاشت طحالب التخليق الضوئي تحت الجليد السميك، بالنظر إلى حاجتها إلى أشعة الشمس. لقد اجتازت سلالات الطحالب

الخضراء والحمراء الكرات الجليدية لحقبة الطلائع الحديثة من دون أن تتأثّر. ومن بين المقترحات لحلّ هذه المعضلة أن الحرارة المحيطة بالبراكين سمحت بتكوُّن مساحات مفتوحة من المياه أو جليد رقيق شفّاف. لكن هناك آخرين يشكّكون فيما إذا كانت الأرض بأسرها تجمّدت بالفعل. تُنتج بعض عمليات المحاكاة الحاسوبية المُعقَّدَة نوعاً ما للمناخ القديم للأرض حزاماً استوائياً لمساحات المياه المفتوحة - الأرض ذات الحزام المائي - لأن هذه المنطقة مُحاطة بجليد عارٍ ذي وضاءة متوسّطة، بينما الجليد الشديد الانعكاس المُغطى بالثلوج لا يوجد سوى عند خطوط عرض عالية.

أيّاً يكن ما حدث، فالسبب وراء الفترات الجليدية لحقبتي الطلائع الحديثة والقديمة على الأرجح كان تراجع مفعول الدفيئة. والقارات تنجرف بسبب الصفائح التكتونية، وعمليات إعادة بنائها تجعلها تتراكم في المناطق الاستوائية قبل عصور الكرة الجليدية القديمة. ولعل سقوط الأمطار على القارّات الاستوائية أدى إلى تراجع مستويات ثاني أكسيد الكربون إلى ما دون المثالي، ما أهَّلَ الأرض للتجمّد. علاوة على ذلك، إنَّ تَصَادُف ارتفاعات مستوى الأكسجين مع عصور التجمّد يوحي بِمُحفِّز يتمثّل في الميثان، وهو غاز آخر من غازات الدفيئة. والأرجح أن الزيادات في نسبة الأكسجين كانت مرتبطة بتناقصات سريعة في نِسَب الميثان نظراً لأن الوفرة العالية في الغازين معاً متناقضة، إذ إنهما يتفاعلان.

إن الدرس المستفاد لعلم الأحياء الفلكيّة من الكرة الأرضية الجليدية هو أن المحيط الحيويّ على كوكب شبيه بالأرض يتمتع بالمرونة. فرغم التقلّبات المناخية الشديدة، صمدت الحياة على الأرض وظهرت بعد حقبة الطلائع الحديثة على هيئة عصر جديد للحيوانات.

حول نشأة حياة مُتقدِّمَة

غالباً ما نتساءل في عِلم الأحياء الفلكيّة عما إذا كانت الحياة الشبيهة بحياة الحيوان موجودة في مكان آخر في المجرّة. وهذا الاحتمال ربما يُمكن أن يسترشد بالتطوّر على كوكب الأرض. فلِكي تصبح الحياة الأرضية مُعَقَّدَة، كان عليها التغلّب على عقبتين أساسيتين على الأقل. الأولى أن الحياة كان لزاماً عليها أن تكتسب خلايا مُعقَّدَة ضرورية للتمايز على المستوى الأكبر، أي خلايا ذات مميّزات وظيفية، مثل خلايا الكبد في مقابل خلايا المخ. والحيوانات والنباتات الضخمة الثلاثية الأبعاد والمتعدّدة الخلايا تُصنع من خلايا حقيقية النواة فقط، الأمر الذي يمكن أن يتطوّر إلى مجموعة أكبر بكثير من أنواع الخلايا مقارنةً بخلايا الميكروبات (انظر الفصل الخامس).

وثمة سلف ثانٍ لنشأة الحيوانات هو وجود الكمية الكافية من الأكسجين لتوليد طاقة كبيرة بواسطة الأيض الحيهوائي (المُستعين بالأكسجين)، مثل أيض البشر. والطاقة الكافية ضرورية ليكبر الكائن الحيّ ويتحرّك. أمّا الأيض اللاحيهوائي الذي لا يستخدم الأكسجين، فهو يُنتِج كمية طاقة أقل بعشر مرات تقريباً لقاء كمية الطعام ذاتها المُستهلكة مقارنةً بالأيض الحيهوائي. قد نتساءل بالنسبة للحياة الأرضية عما إذا كان في الإمكان استخدام الفلور أو الكلور - وكلاهما عامل مُؤكْسِد قوي - عوضاً عن الأكسجين لتوليد مستويات عالية من الطاقة. والإجابة هي «لا». فالفلور شديد التفاعل لدرجة

أنه يمكن أن ينفجر إذا ما تماسَّ مع المادة العضوية، بينما ينحل الكلور ليصنع مُبيِّضاً ضارّاً. من الواضح أن الأكسجين هو أفضل أكسير للحياة المُعقَّدَة في الجدول الدوري - يتفاعل بالقدر الكافي لكنه ليس عنيفاً في تفاعله أكثر من اللازم.

والحاجة لا تقتضي وجود الأكسجين وحسب، وإنما تقتضي أن يكون مُركّزاً أيضاً. والأرجح أن أول شكل من أشكال الحياة الحيهوائية المتعدّدة الخلايا تألّفَ من تجمّعات من الخلايا التي نتجت عندما أخفقت الخلايا المُنقسمة في الانفصال. وكانت مثل هذه التجمّعات محدودة من حيث الحجم بسبب انتشار الأكسجين داخل الخلية الأعمق بحيث سمحت المستويات العليا للأكسجين الخارجي بتكوُّن تجمّعات خلايا كبرى. وعند معدّلات الأيض المثالية، يحتاج سلف الحيوان البالغ حجمه بضعة سينتمترات، والمُقيّد بانتشار الأكسجين، إلى تركيزاتٍ من الأكسجين الجويّ تتجاوز 3%. ويوازي ذلك الزيادة في كمية الأكسجين منذ نحو 580 مليون سنة التي أذنت بظهور الحيوانات.

أثبتت أحافير الطحالب أنّ حقيقيات النوى وُجِدَت قبل ظهور الحيوانات بفترة طويلة. ومن ثمَّ لعل الفتيل البطيء الذي اشتعل تمهيداً للانفجار الكمبري تمثَّلَ في الوقت الذي استغرقه الأمر لمُراكمة كمية كافية من الأكسجين. ويمكننا حتى تحديد زمن الأكسجة بوصفه الوقت اللازم للوصول إلى مستويات الأكسجين الكافية لنشأة حياة حيوانية. وقُدِّرَ هذا الزمن على كوكب الأرض بأربعة مليارات سنة من بعد تكوُّن الأرض.

إن زمن الأكسجة على أسطح الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض ليس مؤكّداً نظراً لأننا ما زلنا نحاول فهم ما الذي حدّد المقياس الزمني للأرض. غير أن الأكسجين ينشأ من الماء السائل. ومن ثمَّ فإن الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض ذات المحيطات تمتلك إمكانات تكوين أغلفة جوية غنية بالأكسجين إذا تطوّرت عملية التخليق الضوئي المُفَكِّكَة للماء. لو تجاوز زمن الأكسجة 12 مليار سنة على كوكب خارجي بعينه نظراً لأنه يملك مادة تتفاعل مع الأكسجين، لتحوَّلَ نجمه المستضيف له الشبيه بالشمس إلى «عملاق أحمر» قبل أن تتوافر الظروف المواتية لحياة الحيوان، ولقُدِّرَ للكوكب ألّا يملك شيئاً أكثر تعقيداً من الوحل الميكروبيّ. لكن لو كان لكواكب خارجية أخرى أزمنة أكسجة أقصر، فربما نشأت الحياة المعقدة عليها أسرع مما نشأت على الأرض.

هل هناك اتجاهات مختلفة نحو التطور؟
الدرس المستفاد من حالات الانقراض الجماعي

عندما تتطوّر الحيوانات، ربما نتساءل عما إذا كان التطوّر قد استهل اتجاهاً نحو المزيد من التعقيد. لِننظر إلى الحياة على اليابسة. عُثر في مستعمرة اليابسة على أوائل أبواغ النباتات منذ نحو 470 مليون سنة، بينما عُثِرَ على أحافير أجزاء الكثير من النباتات منذ نحو 425 مليون سنة. وظهرت الحشرات على الأرض منذ نحو 400 مليون سنة، وبعد ذلك تطوّرت الأسماك وتحوّلت إلى برمائيات منذ نحو 365 مليون سنة، وأصبح نسلها في نهاية المطاف زواحف وثدييات، بما فيها نحن. وهذا اتجاه للمحيط الحيوي يقضي باستغلال المزيد من موارد الأرض. لكن التصوّر الخاطئ

هو الاعتقاد بأن التطوّر ارتقاء منتظم انتهى بِنا وخلص إلينا. إن السجل الأحفوري يُظْهِر أن الأجناس تنشأ وتهلك. علاوة على ذلك، تُقوِّض حالات الانقراض الجماعي تنوّع الحياة المُعقَّدَة على نحو مُتقطِّع. وهي أحداث يهلك فيها أكثر من 25% من الفصائل، إذ تشير كلمة «الفصيلة» إلى المستوى البيولوجي الأعلى من الجنس والنوع (انظر الفصل الخامس). وتشير أحداث الانقراض الجماعي تلك إلى الجزء غير الميكروبيّ للمحيط الحيوي بالطبع.

لم تحدث زيادة في التنوّع سوى قُرب الانتقال من دهر الطلائع إلى دهر الحياة الظاهرة، لأن الكائنات الحية في تلك الفترة اكتسبت بنى جسمانية وسبلاً للعيش صَمَدَت في مواجهة الصعوبات. وفي الحيوانات، كان من بين الإبداعات الأساسية التجويف الجسماني (أو ما يُعرف بالجوف العام «coelom») الذي يمكن ملؤه بالسائل لإمداده بالصلابة والسماح بتركيز القوَى من العضلات. ولقد يسَّرَ هذا الشكل الدفع الذاتي الذي تحسَّنَ بقدر أكبر بفعل الهياكل الصلبة الخارجية أولاً ثمّ الداخلية بعد ذلك. والأرجح أنّ سباق تسلح تطوريّ بين الكائنات المُفترسة والفرائس أفضى إلى الانفجار الكمبري لأنواع الحيوانات المختلفة. وزاد التنوّع النباتي بعد ذلك بالتزامن مع تطوّر النظم الوعائية بخلايا صلبة لنقل الغذاء والأعضاء ذات الصلة التي أفضت في نهاية المطاف إلى نشأة الأشجار.

وقعت في الخمسمئة مليون سنة الماضية خمسة أحداث انقراض جماعي أهلكت ما يربو على 50% من الأنواع، أكبرها حدثان وقعا قبل 251 مليون سنة و65 مليون سنة تباعاً. وفيما خلا التماسيح، لم يصمد أي حيوان بريّ أكبر حجماً من كلب أليف أمام الانقراض الأكبر الذي فصل ما بين العصر البرميّ (Permian، من 229 إلى 251 مليون سنة) والعصر الترياسيّ (Triassic، من 251 إلى 200 مليون سنة). ولقد حصد هذا الحدث أرواحاً كثيرة جداً في المحيطات. على سبيل المثال، كانت المفصليات ثلاثية الفصوص - وهي رموز البحار في العصر الكمبري - في تراجع مستمر، غير أن الانقراض البرميّ-الترياسي أهلكها عن بَكْرَة أبيها. ومحا ثاني أكبر انقراض جماعي منذ 65 مليون سنة الديناصورات، وفَصَلَ ما بين العصرين الطباشيري (Cretaceous، من 145 إلى 65 مليون سنة) والباليوجينيّ (Paleogene، من 65 إلى 23 مليون سنة). (وتشير بعض المؤلّفات إلى هذا الحدث بوصفه طباشيريّاً-ترياسيّاً وفقاً لنظام التسمية الأقدم). ولقد دمَّرَ الانقراض الجماعي البرميّ-الترياسيّ 95% تقريباً من الأنواع البحرية وما يتراوح بين 70% و80% من الحيوانات البرية، بينما أفنى الانقراض الجماعي الطباشيريّ-الباليوجينيّ ما بين 65% و75% من الأنواع كافة.

ومن الواضح أن السبب في حدوث الانقراض الجماعي البرميّ-الترياسيّ هو سلسلة من الكوارث التي تسبّبت فيها الأرض ذاتها. ويبدو أن المحفز الأساسي للكوارث نشاط بركاني واسع النطاق في سيبيريا غطى مساحة من الأرض تضارع مساحة قارة أوروبا. ونظراً لأن الرواسب الفحمية تستقر تحت هذه المنطقة، فقد ضخَّ النشاط البركاني كميات مهولة من غازي الدفيئة الميثان المشتق من الفحم وثاني أكسيد الكربون، ما أدى إلى تدفئة المحيط وجَعْله حامضاً. إن الأكسجين أقل ذوباناً في الماء الدافئ، ومن ثمّ أمست أعماق البحار خالية من الأكسجين، الأمر الذي ربما أدى إلى أن تَلْفظ تلك الأعماق كبريتيد الهيدروجين السامّ إلى السطح. ولقد أفنى مزيج الدفء المناخي وتَحمُّض

المحيطات والغازات السامة أشكال حياة أكثر مما فعل أيُّ حَدَث على الإطلاق في دهر الحياة الظاهرة.

ويبدو أن اصطدام كويكب يبلغ قطره 10 كيلومترات قد أدى إلى الانقراض الجماعي الطباشيريّ-الباليوجيني. ومن بين التبعات الكارثية لهذا الحدث الدمار المؤقّت لطبقة الأوزون واندلاع حرائق الغابات العالمية، وسقوط الأمطار الحمضية والبرودة المناخية اللاحقة الناجمة عن ضخّ جُسيمات الكبريتات في الغلاف الجوي، التي عكست ضوء الشمس. ولقد عُثِرَ على الفوهة الناجمة عن الاصطدام على بُعد كيلومتر واحد تحت الأرض على مقربة من بلدة شيكسولوب المكسيكية.

تدمّر أحداث الانقراض الأنسال التي نجحت في الصمود في السابق، لكنها تتيح فرصاً أيضاً لأنسال أخرى. فأنت تطالع هذا الكتاب عزيزي القارئ بسبب اصطدام شيكسولوب. فقد سادت الثدييات فور أن هلكت الديناصورات.

من ناحية أخرى، تعني أحداث الانقراض الجماعي أنه لو تطوّرت حضارة ما، فإنها من الممكن أن تُمحى وتهلك. ومن المفترض أن تَحدُث الاصطدامات بحجم ذاك الاصطدام الذي أدى إلى الانقراض الطباشيريّ-الباليوجيني كل 100 مليون سنة تقريباً على الأرض، تزيد أو تنقص بضع سنوات. والمغزى الضمنيّ أن الحضارات على الكواكب الخارجية يمكن أن تكون قصيرة الأمد مقارنةً بعُمر الكون بسبب مثل هذه الكوارث العشوائية وحسب. ومن ثم، فمن الممكن أن يظل الكوكب الشبيه بالأرض مناسباً للحياة، غير أن الحضارات تكون على الأرجح زائلة عليه. وللاحتمال الأخير تبعات في سياق البحث الفلكيّ عن ذكاء خارج الأرض (الفصل السابع).

الفصل الخامس الحياة: كيف يصنع الجينوم جينومات أفضل وأكثر عدداً

الفصل الخامس
الحياة: كيف يصنع الجينوم
جينومات أفضل وأكثر عدداً

الحياة على الأرض: المشهد من عَلٍ

قدَّمتُ في الفصل الأول تعريفاً عاماً للحياة، لكن من المفيد في سياق بحثنا عن حياة في مكان آخر أن نتعرف على مثالنا الوحيد للحياة بقدرٍ كبير من التفصيل. وتحقيقاً لهذه الغاية، لنبدأ بالمنظور العالمي لعلم الأحياء الأرضي ونشقّ طريقنا رجوعاً إلى الخلايا والجزيئات.

لنتخيّل معاً مسافراً بين النجوم يصل إلى الأرض ويريد أن يتعرّف على علم الأحياء الخاص بنا. لعله استنتج من كوكبه أنّ الحياة موجودة هنا بسبب الغلاف الجوي الأرضي الرطب الغني بالأكسجين بصورة شاذّة، أو لعله انتقى فقرات بثٍ تلفزيونيّ ترجع إلى عقود ماضية لم تثبط عزيمته عن زيارة الأرض. والمذهل أنه يتكلم الإنجليزية (كما هو شأن جميع الكائنات الفضائية في الأفلام السينمائية)، وبضربة حظ حطَّت مركبته الفضائية في بلد ناطق بالإنجليزية! فماذا ستقول له؟

على المستوى العالميّ، المحيط الحيويّ للأرض هو مجموع الكائنات الحية والميتة كافة. وأحياناً يضم هذا الاصطلاح المناطق غير الحية التي تشغلها أشكال الحياة. وبتقدير كمية المحيط الحيوي بمليارات الأطنان من الكربون (الطن = ألف كيلوجرام)، يمكننا تحديد مكوّناته العامة. تُقدَّر الكتلة الحيوية على الأرض بنحو 2000 مليار طن من الكربون، منها ما يتراوح بين 30% و50% حي والباقي ميت. وفي المحيطات، تدبُّ الحياة فيما يتراوح بين 0.1% و0.2% من نحو 1000 مليار طن من كربون الكتلة الحيوية. والغابات هي السبب في وجود كتلة حيوية حية أكثر بكثير على اليابسة مما في المحيطات.

ثمَّة قضية مُعلَّقة ترتبط بالحياة في مكان آخر (تحت سطح المريخ أو قمر المشتري المعروف باسم يوروبا)، ألا وهي مدى المحيط الحيوي تحت السطحي أو «الحياة داخل الأرض». يقترح بعض العلماء أنَّ ثمَّة كتلة ضخمة من الميكروبات تمتد تحت قاع البحر مسافة كيلومتر أو اثنين، وتتوغّل أكثر من 3 كيلومترات تحت الأرض. والحدُّ الفاصل بين الحياة والموت في تلك الأعماق هو الحرارة. فكلما توغّلنا إلى أسفل، تزداد الحرارة (كما يعلم عُمال المناجم)، وعند مرحلة ما، تصبح الحرارة أعلى حتى من قدرة أقوى الميكروبات على تحمّلها. إن الكتلة الحيوية للمحيط الحيوي تحت السطحي للأرض غير مؤكّدة لأنه لم تُجرَ عمليات حفر عميق في جميع أنواع البيئات تحت السطحية، لكن التقديرات تتراوح ما بين 1% و30% من الكتلة الحيوية الحية للأرض.

وأيّاً تكن الكتلة الحيوية للمحيط الحيويّ، فهي تُقدَّر بأقل من واحد على المليار من كتلة الأرض، ورغم ذلك في وسع المحيط الحيوي أنْ يؤثِّر بشدة على التركيبة الكيميائية لبيئة السطح. ويستطيع المحيط الحيوي أن يترك هذا الأثر لأنه يملك كميات كبيرة من المادة ذات معدل الدوران السريع. وبذلك، فإن الأفراد يعيشون ويهلكون لحظيّاً تقريباً على المقاييس الزمنية الجيولوجية. وعادةً ما تتكاثر الميكروبات خلال فترة تتراوح ما بين عشرات الدقائق إلى أيامٍ معدودة، بينما تصمد الكائنات الحية المتعدّدة الخلايا بضعة آلاف من السنين لا أكثر على الأغلب قبل أن تتحوّل إلى سمادٍ لا حياة فيه للتحلّل الميكروبيّ. على سبيل المثال، من بين الفئة الأخيرة، وُجِدَ أن أقدم كائن حي غير متناسل هو شجرة صنوبر بريستلكون (Bristlecone Pine) موجودة في سلسلة جبال وايت في كاليفورنيا، ونبتت منذ نحو 3049 سنة قبل الميلاد، أي قبل عدة قرون من إنشاء أوائل الأهرام المصرية، لكنها تُمثِّل ومضةً في الزمن الجيولوجيّ.

إن الأنشطة الأساسية في المحيط الحيوي اليوم هي التخليق الضوئي الأكسجينيّ وعَكْسِه الكيميائي عبر التنفس الهوائي والأكسدة (الفصل الرابع). لكن الميكروبات تمتلك نطاقاً عريضاً جداً من عمليات الأيض الأخرى التي سنتناولها بالنقاش لاحقاً.

توجد الميكروبات بطبيعة الحال في كل مكان تقريباً على سطح الأرض. وثمَّة نوع من بكتيريا المياه المالحة والعذبة يُدعى بيلاجيبكتر أوبيك (Pelagibacter ubique) يُعدُّ على الأرجح الكائن الحي الأكثر عدداً على سطح الأرض. ورغم ذلك، فقد وُصِفَ أول مرة عام 2002 فقط، ما يثبت كيف أنّ علم الأحياء ما برح يتطوّر. يوجد إجمالاً نحو 1029 ميكروب من جميع الأنواع في المحيط، أي ما يتجاوز بكثير عدد النجوم البالغ 1022 في الكون المنظور. والميكروبات موجودة بوفرة على الأرض أيضاً. فهناك نحو 100 مليون إلى 10 مليارات ميكروب لكل جرام من التربة السطحية. وعادةً ما يحتوي الهواء الداخلي على مليون بكتيريا لكل متر مكعب. وهناك بكتيريا واحدة في المتوسط (رغم أنّ الحياة فارقتها) تحوم في كل 55 متراً مكعّباً في الهواء على ارتفاع 32 كم في طبقة الستراتوسفير.

هناك أربع خصائص أساسية سمحت بالسكنى الكثيفة في الأرض، أهمها على الإطلاق الماء السائل المنتشر انتشاراً واسعاً. فجميع الكائنات الحية التي تعتمد على الأيض تحوي جزيئات عضوية مُوزَّعَة في محلول مائي. وبالتالي، فإننا لا نتوقّع وجود حياة على سطحٍ جاف تماماً، مثل سطح كوكب الزهرة. والخاصية الأساسية الثانية هي امتلاك الطاقة اللازمة لعملية الأيض. إن ضوء

الشمس هو المصدر الأساسي للمحيط الحيوي للأرض، لكن بعض الكائنات الحية تحصل على طاقتها من التفاعلات الكيميائية في الظلام، ما يعني أنه ليس من المستحيل أن تكون أشكال الحياة الشبيهة بالميكروبات موجودة تحت سطح المريخ أو القمر يوروبا. والخاصية الثالثة الواهبة للحياة هي الإمداد المتجدّد بالعناصر الكيميائية الأساسية. فالكوكب الذي لا يستطيع أن يُعيد إمداد كائناته بالعناصر الحيوية عبر دورات طبيعية (مثل دورة المياه أو الصفائح التكتونيّة) سيكون مُهلِكاً. وثمة خاصية رابعة ربما كانت حيوية للحياة هي وجود صِلات بين الجوامد والسوائل والغازات. وإنه لمن المفيد أن يعيش المرء عند نقطة التقاء مستقرة، كأن يعيش على البَر أو على سطح المحيط. ولذلك، فمن الصعب أن توجد الحياة على عملاق غازي مثل المشتري الذي لا يملك أي سطح. يمكن التخمين بأن الحياة قد تكون ممكنة عند ارتفاعات محددة في الغلاف الجوي للمشتري، لكن الاضطرابات العميقة التي يسبّبها الحمْل الحراري ستُغرِق الحياة بشكلٍ دوري في جوٍّ داخلي من الحرارة والضغط المُهْلِكين.

نظرة داخلية على الحياة الأرضية: الخلية

لقد تناولنا علم الأحياء حتى الآن على نطاق عالمي، لكن الكائنات الحية كافة تتألف تحت المجهر من خلايا من أنواع مختلفة تُقسمها إلى ثلاثة نطاقات: نطاق حقيقيات النوى (Eukarya) ونطاق العتائق (Archaea) ونطاق البكتيريا. والنطاقان الأخيران ميكروبيان، وأحياناً يُجمعان معاً ضمن فئة بدائيات النوى (prokaryotes)، لكن كثيراً من علماء الأحياء الدقيقة يَعدُّون هذا المصطلح عتيقاً لأن العتائق والبكتيريا نطاقان مختلفان من الناحية الكيميائية الحيوية. إن الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (الدنا) يطفو بِحُريَّة في منتصف خلايا العتائق وخلايا البكتيريا، بينما في حقيقيات النوى يوجد الدنا داخل النواة المحاطة بغشاء. والعتائق والبكتيريا وحيدة الخلية، فيما خلا بعض أنواع البكتيريا التي تلتحم على هيئة صف لتُشكِّل خيوطاً. ويمكن أن تكون حقيقيات النوى وحيدة الخلية، مثل الأميبا أو خميرة الخبز، لكن حقيقيات النوى فقط هي التي تمثِّل كائنات حية كبيرة ثلاثية الأبعاد ومتعدّدة الخلايا، مثل الفطر أو البشر.

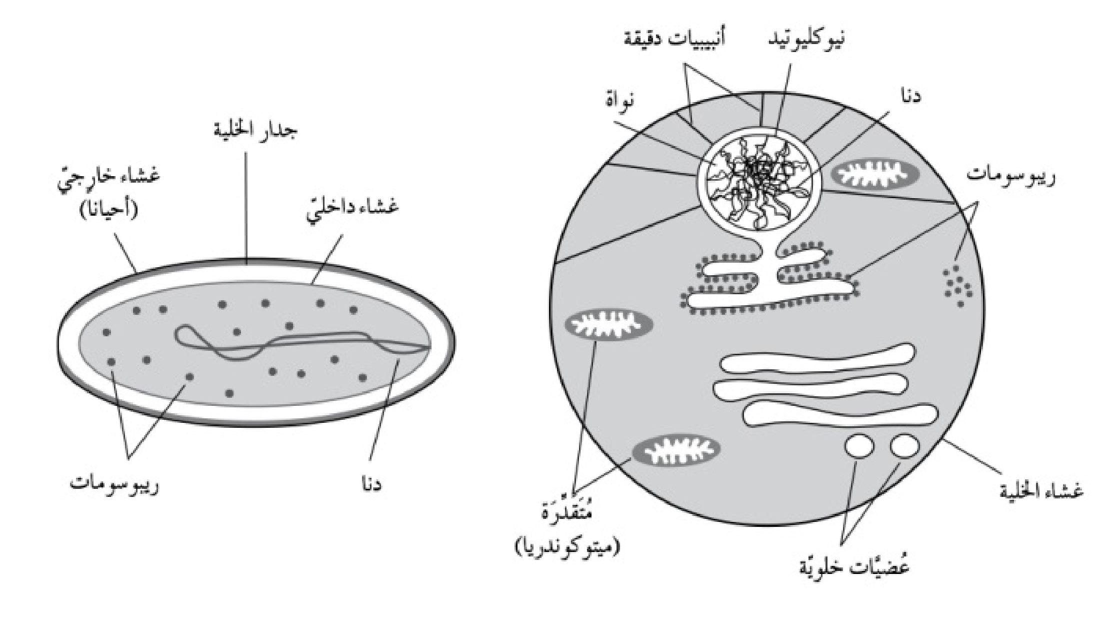
لقد شجَّع علم الوراثة على تصنيف الكائنات إلى ثلاثة نطاقات في الحياة، ونَسَخَ هذا التصنيفُ نظام «الممالك الخمس» لتصنيف النباتات والحيوانات والفطريات ووحيدات الخلايا (حقيقيات النوى الوحيدة الخلية) والبكتيريا. ومع ذلك، ما برحت هذه المصطلحات القديمة مُستخدمة في علم التصنيف الذي يُصنِّف الكائن الحي تحت نطاقه بحسب المملكة والشُعبة والطائفة والرُتبة والفصيلة والجنس والنوع. والعبارة المُخْتَزَلَة التي أستخدمها أنا شخصياً لحِفْظ هذه المستويات (أو التصانيف) غير لائقة إلى حدٍّ بعيد فلا أستطيع أن أوردها هنا، لكن ثمّة عبارة أخرى هي («ملكتُ شجراً طابَ رزقاً فطلعُهُ جداً نضيد»)*. والمستويات التصنيفيَّة للإنسان مثلاً هي: مملكة الحيوان - شُعبة الحبليَّات - طائفة الثدييات - رُتبة الرئيسات - الفصيلة الأناسيَّة - جنس البشر - نوع الإنسان العاقل. لقد طوَّرَ عالم النبات السويديّ كارولوس لينيوس (Carolus Linnaeus، 1707-1778) الذي سَكَّ لنا كلمة بيولوجيا، علم التصنيف الحديث، بما في ذلك نظام التسمية الثنائية للكائنات الحية،

مثل الإنسان العاقل (Homo sapiens). لكن الأمر اقتضى نشأة نظرية التطوّر وعلم الأحياء الجزيئيّ لإماطة اللثام عن الوحدة الكيميائية الحيوية للحياة والأصل الوراثي المشترك.

ورغم أنّ هناك بعض أوجه الشبه بين نطاق حقيقيات النوى والنطاقيْن الآخرَين، هناك أيضاً فجوة في مستوى التعقيد. فالبكتيريا والعتائق عادةً ما يتراوح حجمها بين 0.2 و5 ميكرون (واحد على مليون من المتر)، مع بعض الاستثناءات النادرة، في حين أن حجم خلايا حقيقيات النوى يكون أكبر بشكل عام، إذ يتراوح حجمها ما بين 10 و100 ميكرون. وتحوي خلايا حقيقيات النوى الأكبر حجماً عُضَيَّات (organelles) تتولى تنفيذ وظائف تخصصيَّة، تُماثِل أعضاء الجسم البشري (الشكل 4). على سبيل المثال، تتولى المُتقدِّرَات (Mitochondria) وظيفة التنفس. وفي خلايا النبات أو خلايا الطحالب، تؤدي البلاستيدات الخضراء (صانعات اليخضور) عملية التخليق الضوئي. لكن ثمة سِمة مُشتركة بين جميع الخلايا، ألا وهي العدد الكبير للريبوسومات (ribosomes)، وهي بِنى كرويَّة تصنع البروتينات. على سبيل المثال، في بدائيات النوى أو حقيقيات النوى البسيطة، مثل الخميرة، قد تمتلك الخلية عدة آلاف من الريبوسومات، بينما في الخلية الحيوانية ربما يصل عدد الريبوسومات إلى عدة ملايين.

بالنظر إلى عناية علم الأحياء الفلكية بالحياة المُعقدة خارج كوكب الأرض، قد نتساءل لِمَ تنتج الخلية الحقيقية النواة

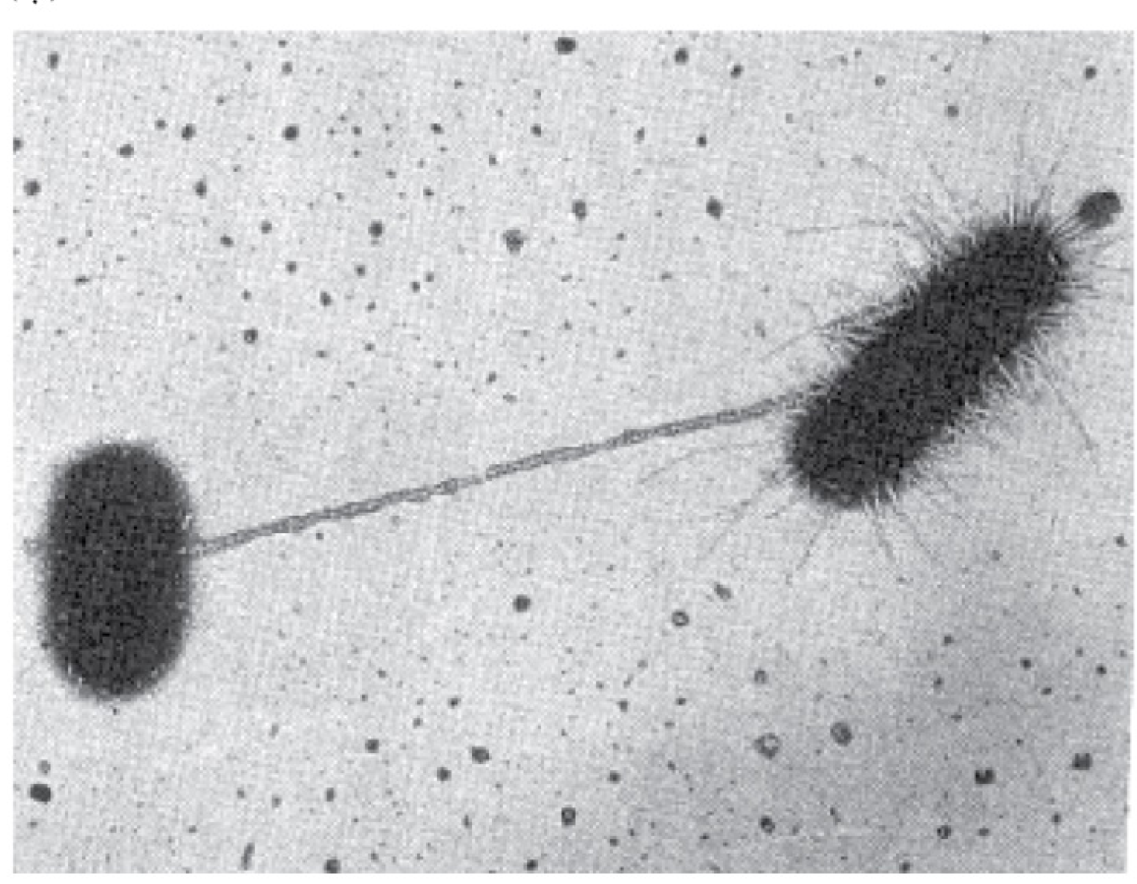
(أ)



حقيقي النواة

بدائيّ النواة

(ب)



4. (أ) رسم تخطيطيّ لبنية كائن بدائي النواة (العتائق والبكتيريا) مقابل بنية كائن حقيقي النواة؛ (ب) نوعان من البكتيريا التُقِطت صورتهما أثناء اقترانهما.

وحدها من دون غيرها أشكال حياة كبيرة ثلاثية الأبعاد متعددة الخلايا. والإجابة ليست معلومة بالكامل، غير أنّ خلايا حقيقيات النوى تتمتع ببنيةٍ خلوية أو هيكل خلوي داخلي ديناميكي أكثر تعقيداً وتطوّراً من العتائق أو البكتيريا. ويتكون هذا الهيكل الخلويّ من فتائل ميكرويَّة بروتينية وأنابيب بروتينيّة دقيقة («أُنيبيبات دقيقة») ومحرّكات جزيئية تتحكّم في بنية الخلية وتساعد في توصيل جزيئات التأشير لتغيير التركيب الفسيولوجي للخلية. ومن ثمَّ فإن القدرة على التطوّر والتحوّل إلى العديد من الأشكال المتخصّصة (مثل خلايا الجلد أو المخ) كامنة في بنية الخلية الحقيقية النواة. إن البكتيريا الزرقاء قادرة على صنع فتائل مئات الخلايا على التوالي، مع بعض أنواع الخلايا المختلفة، لكن هذا أقصى ما يمكنها فعله. وخلافاً للعتائق أو البكتيريا، تمتلك حقيقيات النوى جينومات أكبر حجماً وذات وحدات أكثر عدداً، ما يسمح لها أيضاً بمزيد من التعقيد. ولو لم تكن هناك خلايا حقيقيات النوى، لكانت الأرض أكثر رتابةً بكثير مما هي عليه، ولَمَا وَجِدت جميع الكائنات الحية المألوفة في عالمنا - من حيوانات ونباتات وطفيليات - أساساً. وهكذا عندما نفكّر في الحياة الأكثر تعقيداً على الكواكب الخارجية، ينبغي أن نتساءل عمّا إذا كان التطوّر سيخلق خلايا شبيهة بحقيقيات النوى في أماكن أخرى. ولهذا السبب، يحظى أصل حقيقيات النوى باهتمام عظيم.

يوحي علم الوراثة الحديث بأن الخلية الحقيقية النواة هي «وحش فرانكشتاين» جُمِعَ في التاريخ التطوّريّ من شذرات من البكتيريا والعتائق. على سبيل المثال، اشتُقَّت المُتقدِّرَة في الخلايا الحقيقية النوى من بكتيريا تعيش أصلاً عيشةً تكافلية داخل خلية أخرى. والخلية الكبرى، التي ربما كانت تنتمي للعتائق أو كانت «حقيقية نواة أولية» لم يَعُد لها وجود، ابتلعت البكتيريا الطليقة، وفي خضم أهم ابتلاع في التاريخ نَشَأَ سلف المُتقدِّرَة. والواقع أن الدنا المنفصل داخل المُتقدِّرَة يقدِّم دليلاً على أصله البكتيريّ. ويُظهر الدنا المتميّز لصانعات اليخضور في خلايا النبات والطحالب أنّ صانعات اليخضور اشتُقَّت بطريقة شبيهة من بكتيريا زرقاء تكافلية آل بها المآل إلى العيش داخل خلايا أكبر حجماً. وإن جميع الخلايا الموجودة في أوراق النباتات الخضراء تحتوي عَمَليّاً على سلائف البكتيريا الزرقاء المُستعبدة التي حوصرت واستوعبت منذ فترة طويلة. وتُعرف نظرية هذا الأصل الذي ترجع إليه المُتقدِّرَات وصانعات اليخضور، وغيرها من العضيَّات في خلايا حقيقيات النوى، باسم «التعايش الداخلي» (endosymbiosis).

والعَالَم الخالي من حقيقيات النواة سيخلو أيضاً من النشاط الجنسي. تخيل عَالَمَاً بلا أزهار وبلا أناشيد حب وعشق. إن العتائق والبكتيريا لا تقترن جنسياً، لكنها تتزاوج عندما تتصل خليتان بواسطة أنبوب تنتقل عبره الجينات في أجزاء حمض نووي ريبي منزوع الأكسجين (دنا) تُسمَّى

«البلازميدات» (plasmids). فللأسطح البكتيرية بروزات تُسمَّى «شَعْرَات»، وأثناء عملية التزاوج تمتد شعرة خاصّة إلى الشريك، فتوفِّر مجرى (الشكل 4). وخلافاً للتناسل الجنسي في حقيقيات النوى، لا ينتج التزاوج الميكروبيّ نسلاً، ويتسم بالسهولة والسرعة. وهو أشبه بتَمَاسّك مع شخص آخر أصهب الشعر في أحد المقاهي، فتكتسب جين الشعر الأحمر إذ تغيَّرَ لون شعرك على الفور. ويمكن أن تملك العتائق والبكتيريا أيضاً جينات جديدة عبر التحوُّر (امتصاص الدنا من البيئة المحيطة) والتنبيغ (transduction، تبادل المادة الوراثية بواسطة الفيروسات). والواقع أن الحيازة السريعة للجينات تسمح بالتطوّر السريع للمقاومة البكتيرية للمضادّات الحيوية.

تنتج حقيقيات النوى ذات الخصائص الجنسية الأمشاج (gametes)، أي الخلايا المنوية والبويضات. وفي حقيقيات النوى المُعقَّدَة المتعدّدة الخلايا، يجعل تنوّع الحياة من الصعب بشكل مفاجئ تمييز «الذكور» من «الإناث»، ما يترك لنا التعريف الغريب بأنّ الذكور هم الذين ينتجون الأمشاج الصغيرة، بينما تنتج الإناث الأمشاج الكبيرة. وتندمج الأمشاج بحيث يَنْبع نصف الجينات من الأب والنصف الآخر من الأم. يكون الدنا عادةً خيطاً حلزونياً ملفوفاً بِحُرِيَّة، ولكن قبل انقسام الخلية، يتجمع ذلك الدنا على هيئة كروموسومات مرئية تحت عدسات المجهر. على سبيل المثال، لدى البشر 46 كروموسوماً على هيئة 23 زوجاً في كل خلية، فيما خلا الأمشاج التي تملك نصف هذا العدد، أي 23 كروموسوماً.

هناك العديد من الأفكار التي تفسِّر علة كوْن الجنس موافقاً من الناحية التطوّريَّة لحقيقيات النوى. ويتعلق أحد الاحتمالات بكيفية اختلاط الجينات والمواءمة بينها من الأبوين على كل كروموسوم في عملية تُعرف باسم «التأشُّب» (إعادة التركيب الجيني recombination). ولو وقعت الطفرات الجينية المفيدة كلاً على حدة في شخصين، فسيكون من المستحيل خلق مزيج منهما في كائنات لا تتكاثر جنسياً، أمَّا الكائنات المتُكاثرة جنسياً فيمكنها المزج بينهما وتحصيل المنافع. وعلى النقيض من ذلك، يمكن أن يستبعد الجنس الجينات الرديئة الطافرة بالجمع بين الجينات غير الطافرة معاً في بعض الأفراد، بينما تظل الكائنات الذاتية الاستنساخ حبيسة الجينات الرديئة، ويمكن أن يهلك نسلها بسببها.

تمثِّل الفيروسات مَنْطقة غير واضحة المعالم بين الكائنات الحية وغير الحية خارج النطاقات الثلاثة. فالفيروسات عادةً ما تكون أكثر وفرة من الميكروبات بعشرة أضعاف في ماء البحر أو التربة. وهي تتكوّن من أجزاء من الدنا أو الرنا محاطة بالبروتين، وفي بعض الحالات، تملك غشاءً إضافياً. والفيروسات دقيقة جداً، إذ يتراوح حجمها بين 50 و450 نانومتراً (جزء من المليار من المتر)، إذ تُماثِل الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية. وتُعدُّ الفيروسات عموماً كائنات غير حية لأنها جامدة خارج الخلية، ولا بد لها أنْ تَعدِي الخلايا وتهاجمها كي تتكاثر. لكن بعضها يفعل ذلك من دون أن يلاحظ المُضيف لها أبداً، ومن ثمّ لا تؤدّي كل الفيروسات إلى الإصابة بالأمراض. ثمَّة نظرية من بين العديد من النظريات المعنية بأصل نواة حقيقيات النوى تفيد بأن تلك النواة ربما تطوّرت من فيروس كبير يحوي حمضاً نووياً ريبياً منزوع الأكسجين (دنا)، لكن دور الفيروسات في تطوّر الحياة ما زال مثار نقاش وجدل.

كيمياء الحياة

يقتضي نقاش العديد من جوانب الحياة، مثل الوراثة والأيض، استخدام مفردات الكيمياء الحيوية. والفئات الأربع الأساسية للجزيء الحيوي هي الأحماض النوويّة والكربوهيدرات والبروتينات والليبيدات (الدهون). وكثير من الجزيئات الحيوية متعدّدة الوحدات، شأنها شأن الأثاث الذاتي التجميع. وهناك سلاسل أو بوليمرات من وحدات أصغر تُدعى «مونوميرات» (أحاديات القسيمة).

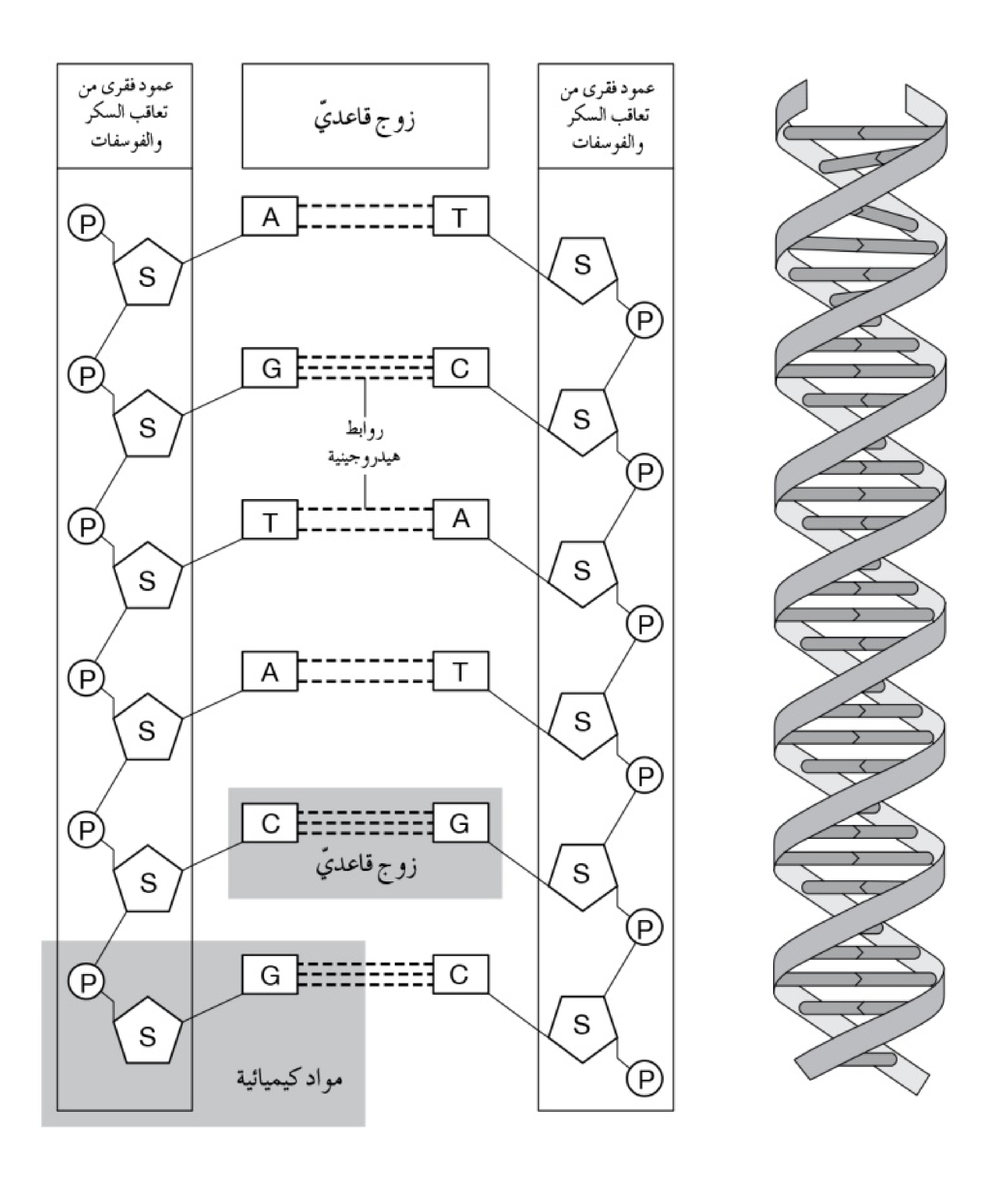
توفِّر الكربوهيدرات الطاقة والبِنية. فهي تحتوي على ذرّات الكربون والهيدروجين والأكسجين بنسبة 1:2:1، ووحدات متكرّرة من الكربون (الماء). ومن ثمَّ فإن تركيبها الكيميائي حَرفيّاً «كربونٌ مميّه». وتوجد السكّريات ذات الذرّات الكربونية الخُماسية في جزيئات الدنا والرنا، بينما السكريات السداسية الكربون توجد في جدران الخلايا، مثل السيليلوز في النباتات.

الليبيدات جزيئات عضوية غير قابلة للذوبان في الماء، لكنها تذوب في محلول مذيب عضوي غير قطبيّ؛ محلول لا يشتمل على شحنة كهربائية كبيرة على أيٍّ من ذراته، مثل زيت الزيتون. ومن ثمَّ لو فَرَمنا حيواناً نافقاً وأغرقناه في محلول غير قطبيّ، فأيُّ شيء يتعرَّض للذوبان هو ليبيد. وتستخدم أشكال الحياة الليبيدات في أغشية الخلايا بمثابة دهون لتخزين الطاقة وجزيئات تأشير. ومن أبرز مكوّنات الأغشية الدهون الفوسفاتيّة التي لها طرف مُحبّ للماء يحوي الفسفور وذيل كاره للماء هيدروكربونيّ يتألف من ذرات الكربون والهيدروجين. ويتشَكَّل غشاءٌ من طبقة مزدوجة من الدهون الفوسفاتية، تُعرف باسم الطبقة الثنائية. وتبرز الأطراف الأليفة للماء لتقتحم وسطاً مائياً على الجزئَين الداخلي والخارجي للخلية، بينما تواجه الذيول بعضها بعضاً في منتصف الغشاء.

والبروتينات بوليمرات مصنوعة من وحدات الحمض الأميني. واستخداماتها تضم الإنزيمات والجزيئات البنيويّة، علاوة على قائمة طويلة من الوظائف الأخرى.

الرنا والدنا حمضان نوويان، وهما بوليمران لأحاديات القسيمة النيوكليوتيديَّة. وكل نيوكليوتيد (nucleotide) مصنوع من سكر خُماسي الكربون وفوسفات وجزء يُعرف باسم «القاعدة» (الشكل 5). ويوجد في الدنا أربع قواعد محتملة. وكلها تحتوي على حلقة أو اثنتَين من ست ذرات؛ أربع منها كربون واثنتان نيتروجين. ولكل قاعدة لها حرف يميّزها: A وC وG وT، وتَرْمز على الترتيب إلى جزيئات الأدينين والسايتوسين والغوانين والثيامين. وتَسْتخدم جزيئات الرنا القواعد الثلاث نفسها، أما ثيامين الدنا فتحلُّ محله قاعدة اليوراسيل (U).

في عام 1953، اشتهر جيمس واتسون (James Watson) وفرانسيس كريك (Francis Crick) باستنتاج بنية الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (الدنا): جديلتان متعدّدتا



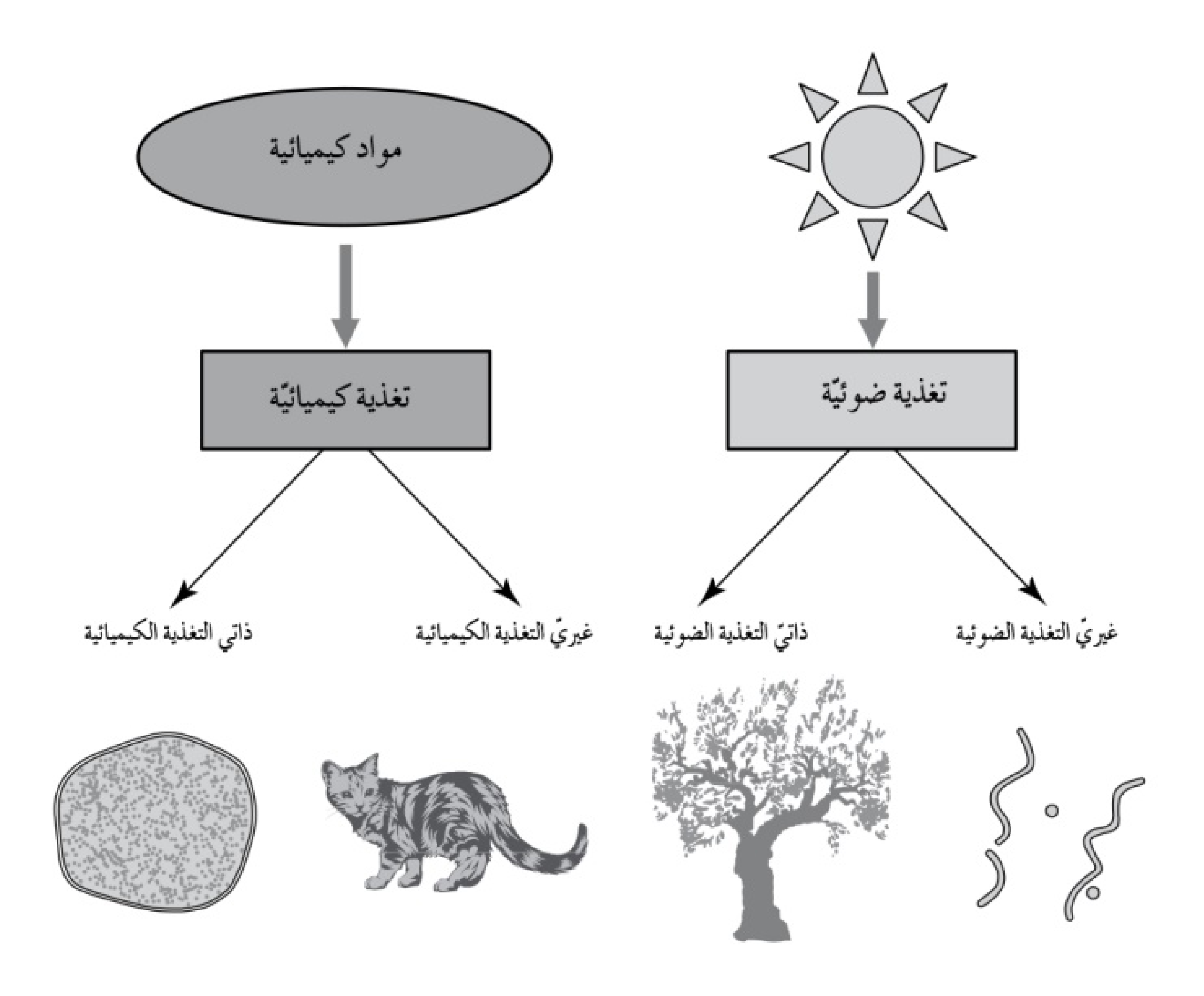
5. *يسار*: يتكون الدنا من جديلتين متصلتين. وكل جديلة مكوَّنة من «عمود فقري» من الفوسفات (P) والسكر (S). وتتصل الجديلتان بزوجين قاعديين. يمين: كل جديلة في الأبعاد الثلاثية لولب، لذا يتكون لدينا إجمالاً «لولب مزدوج».

النيوكليوتيد ملفوفتان على هيئة لولب شبيه بالبرغي (الشكل 5). وتلتصق القواعد على جانبي كل جديلة معاً بواسطة «روابط هيدروجينيّة» تنجذب فيها ذرة هيدروجين مشحونة بشحنة موجبة قليلاً على واحدةٍ من القواعد إلى ذرة مشحونة بشحنة سالبة قليلاً على قاعدة من الجديلة المقابلة. وتَسْمَح المواءمة البنيويّة فقط لقاعدة السايتوسين (C) بالاقتران بقاعدة الغوانين (G)، ولقاعدة الأدينين (A) بالاقتران بقاعدة الثيامين (T). ولكل جزيء من جزيئات الدنا عدّة ملايين من النيوكليوتيدات، وكل كروموسوم في الخلية يحوي لولباً مزدوجاً من الدنا. في المقابل، نجد أن جزيئات الرنا وحيدة الجديلة في الغالب. ومع ذلك، يستطيع الدنا أنْ يلتَّف على نفسه إن وُجِدَت قواعد تكميلية في جزئين منفصلين من الجديلة، مع ملاحظة أن قاعدة الأدينين تقترن بقاعدة اليوراسيل (U) في الرنا.

وتتمتع بنية الدنا بخاصيتَين أساسيتين للحياة سَبَقَ ذكرهما في الفصل الأول، ألا وهما القدرة على التكاثر، ومُخطَّطٌ أولي للتطوير والصيانة. وفي عملية الاستنساخ، ينقسم لولب الدنا إلى جديلتين، وتعمل كل جديلة عَمَل القالب لجديلة جديدة مُكمِّلَة. على سبيلِ المثال، كلما ظَهَرَت قاعدة الأدينين (A) على القالب، أُضيفت قاعدة ثيامين (T) إلى الجديلة المُخَلَّقَة حديثاً، أو العكس. والشيء عينه ينطبق على أزواج قواعد الغوانين-السايتوسين. وفي تلك العملية، تُفْسِح الطفرات والأخطاء المجال للتطوّر.

وإذ يفي اللولب المزدوج للدنا بدوره بمثابة مخطّطٍ أوليّ، فإنه يتفكك بفعل إنزيمٍ ما ليوفر تعليمات لتخليق البروتينات. ويخضع جزء من الدنا المُفكَّك للاستنساخ، فيتحوّل إلى جديلة من الرنا المرسال، وهو النسخة المُكَمِّلَة للدنا، غير أن اليوراسيل (وليس الثيامين) يُقْحَم حيثما يظهر الأدينين في الدنا. وبعد ذلك، يُقْحَم الرنا المرسال في الريبوسوم وكأنه شريط. وفي الشفرة الوراثية، تُحدِّد مجموعة من ثلاثة أحرف (تُعرف باسم الكودون codon)، إضافةً إلى الرنا المرسال، كلَّ حمض أميني في بروتين يتدفّق خارج الريبوسوم.

وإلى جانب التكاثر، يتعيّن على الحياة أن تُديم ذاتها بذاتها عبر الأيض الذي ينطوي على تفكيك الجزيئات بغية تكوين الطاقة (الأيض الهدميّ catabolism) وكذلك بناء جزيئات حيوية (الأيض البنائي anabolism). ويعوِّل تصنيف عمليات الأيض على الحاجة إلى الطاقة والكربون. ولأن كل هذه المتطلبات يمكن الوفاء بها، كلاً بدوره، بطريقتين، فإن لدى علماء البيولوجيا 4 مصطلحات أيضيَّة للكائنات الحية: كائن غيريّ التغذية الكيميائية (chemoheterotroph)، وكائن ذاتي التغذية الكيميائية (chemoautotroph) وكائن غيريّ التغذية الضوئية (photoheterotroph) وكائن ذاتي التغذية الضوئية (photoautotroph) (الشكل 6).



6. مخطط تصنيف أشكال الأيض في الحياة الأرضية.

إن جميع الكائنات الحية (ربما حتى الكائنات غير الأرضية) تنتمي لفئة واحدة أو أكثر من تلك الفئات. وتعني اللاحقة «troph» «تغذية»، والطريقتان اللتان تحصل بهما الكائنات الحية على الطاقة، سواء من المصادر الكيميائية أو من أشعة الشمس، تستدعيان البادئتين «-chemo» و«-photo». وثمة بادئة إضافية، «hetero» أو «-auto»، تستخدم وفقاً للطريقة المتبعة للحصول على الكربون. فإذا كان الكربون يُسْتَجلَب باستهلاك مركّبات الكربون العضوي (مثل السكريات)، تنطبق البادئة «-hetero» (غيري). أما إذا كان الكائن الحي يُحوّل الكربون غير العضوي (مثل ثاني أكسيد الكربون) إلى كربون عضوي - ويُعرف ذلك باسم «تثبيت الكربون» - تُستخدم البادئة «-auto» (ذاتي). وبشكل عام، لا بد أن تَحصل الكائنات غيريّة التغذية على غذائها

كي تصنع طاقة، بينما تستطيع الكائنات الذاتية التغذي تثبيت الكربون وتخليق طاقتها الخاصة بنفسها.

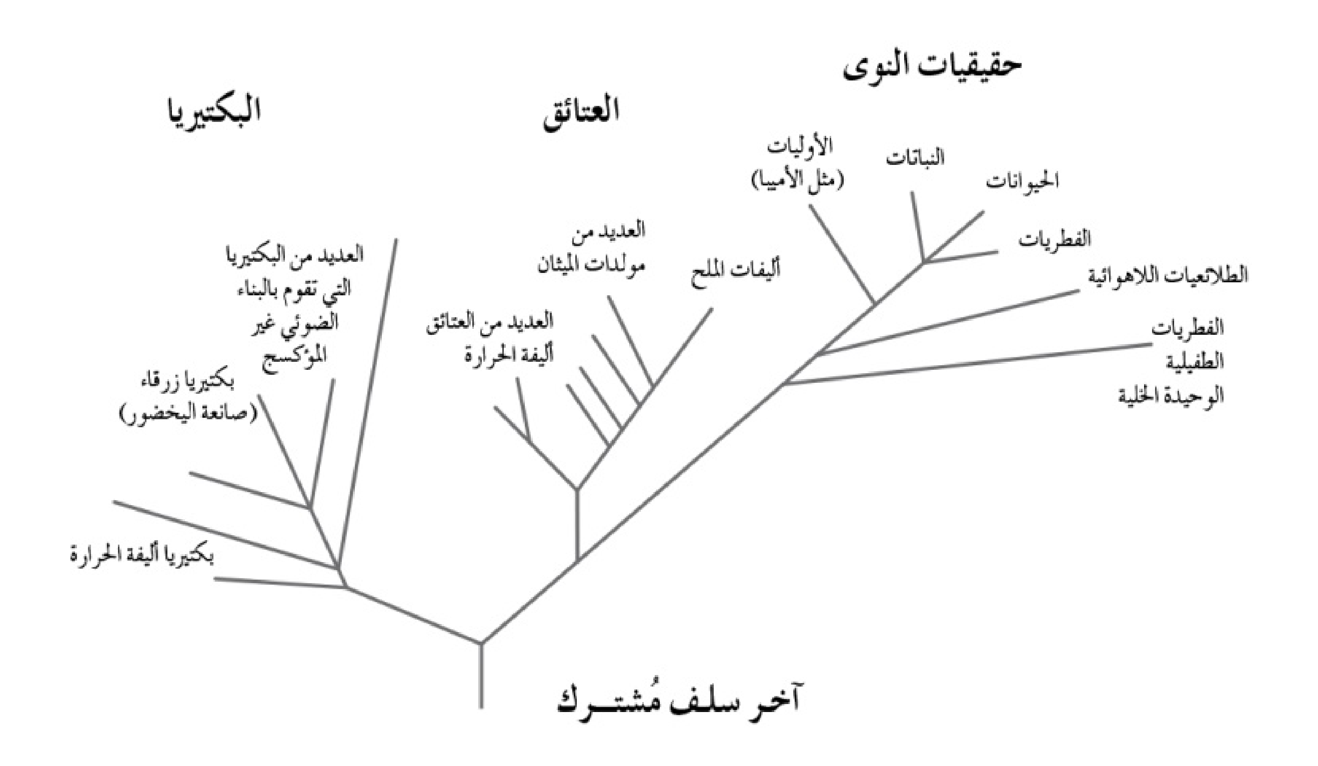
ونحن البشر كائنات غيرية التغذية الكيميائية. فأنا وأنت نستنفد المواد الكيميائية العضوية التي تصنعها الكائنات الأخرى، مثل النباتات. وجميع الحيوانات والطفيليات وكثير من الطلائعيات وغالبية الميكروبات المعروفة غيريَّة التغذية الكيميائية. وعلى النقيض من ذلك، نجد أن الكائن الذاتي التغذية الكيميائية هو ميكروب يستغل المواد غير العضوية، مثل الهيدروجين أو كبريتيد الهيدروجين أو الحديد أو الأمونيا، ليصنع الطاقة التي يستغل بعضها لاستخلاص الكربون من ثاني أكسيد الكربون. على سبيل المثال، تعيش الميكروبات الذاتية التغذية الكيميائية في الظلام في المنافذ المائية الحرارية في أعماق البحار بواسطة أكسدة كبريتيد الهيدروجين وغيره من المواد. (تُعرف الكائنات الذاتية التغذية الكيميائية أيضاً باسم «الكائنات الجماديَّة التغذية» (chemolithotrophs)، إذ اشتُقت تسميتها من كلمة «lithos» اليونانية التي تعني «الحَجَر»، لأن المواد الكيميائية غير العضوية التي تستخدمها تنبثق من مصادر جيولوجيّة). والنباتات والطحالب وبعض البكتيريا الزرقاء جميعها كائنات ذاتية التغذية الضوئية لأنها تستغل ضوء الشمس للحصول على الطاقة، وتَستخلص الكربون من الهواء. وتُعدُّ بكتيريا التخليق الضوئي المُنتمية إلى جنس الكلوروفليكسوس (Chloroflexus)، الموجودة في الينابيع الحارّة، مثالاً على الميكروبات التي تقوم بتمثيل الغذاء بوصفها كائنات غيرية التغذية الضوئية باستخدام أشعة الشمس للحصول على الطاقة، وتكتسب الكربون من المركّبات العضوية التي تصنعها ميكروبات أخرى. وقد تعيش الكائنات الذاتية التغذية الكيميائية على الطبقة الجوفية لكوكب المريخ أو القمر يوروبا، في حين أن الكائنات الضوئية التغذية ربما وُجِدَت في محيطات الكواكب الخارجية الصالحة للسُكنى.

شجرة (أو شبكة) الحياة

يمكن استنباط تاريخ الحياة على الأرض من الطريقة التي غيَّرَ بها التطور الجينات. والتطوّر هو التغير الطارئ على السمات المتوارثة في مجتمع من جيل إلى الجيل التالي له. ولأن الأفراد متنوّعون جينياً، فسيكون بعضهم أقدر على التكيّف في أيِّ بيئة ولديه نسبة نجاح تكاثري أعلى من الآخرين، وهو ما يصفه علماء البيولوجيا «باللياقة» العليا. وفي كل جيل، يهلك الأفراد ذوو اللياقة الدنيا. وهذا هو الانتخاب الطبيعي. ومن ثمَّ تُرَاكِم الأنسال على مدار عدة أجيال قدرات تَكيُّف جيني وتتطوّر أنواعٌ جديدة.

في الكائنات الحية المتكاثرة جنسياً، تمثل الأنواع مجموعات يستحيل أن تتناسل فيما بينها تحت الظروف الطبيعية، مثل البشر والجياد. وكثير من أنواع البكتيريا والعتائق تعيش في أماكن بيئية مختلفة تُحدّد مجموعات منفصلة، لكن الطريقة التي تستطيع بها الجينات أن تنتقل بين الميكروبات تجعل من الأصعب تحديد أنواع الميكروبات؛ ومن ثمَّ يُستخدم التركيب الوراثي لتحديد نوعها، إذ يعد الفارق الذي يتراوح بين 2% و3% في الجينات التي تُشَفِّر الحمض النووي الريبي (الرنا) الموجود داخل الريبوسومات كافياً للفصل بين الأنواع الميكروبية.

نستطيع في الواقع تقييم مدى ارتباط جميع أشكال الحياة عن طريق المقارنة بين الجينات. على سبيل المثال، تُوضِّح الجينات أنّك والفطريات التي تتخلل أصابع قدميك - وكلاكما من حقيقيات النوى - أقرباء أوثق صلةً من القرابة التي بين عتيقة وبكتيريا، رغم المظاهر التي تبين خلاف ذلك.



7. «شجرة الحياة» المبنيَّة من الحمض النووي الريبي الريبوسوميّ.

منذ منتصف الستينيات فما بعدها، طُوِّرَت العديد من التقنيات لتقييم الكائنات الحية على المستوى الجزيئيّ، بما في ذلك مقارنة متواليات الأحماض الأمينية في البروتينات أو النيوكليوتيدات في الرنا والدنا.

تحدِّد الجينات توالي الأحماض الأمينية في البروتين، ومن ثمَّ فإن أوجه الاختلاف في «توالي البروتين» بين الأنواع تكون إمَّا بالتغاير وإمَّا بالترابط. على سبيل المثال، إن بروتين «سيتوكروم سي» (Cytochrom c) بروتين تنفسي ضمن 104 أحماض أمينيّة عُثِرَ عليها في العديد من الكائنات الحية. والمتواليات متطابقة لدى البشر وقردة الشمبانزي، ما يثبت ارتباطهما الوثيق. وبالمقارنة بالبروتين البشري، وُجِدَ أن قرد المكاك الريسوسي يملك حمضاً أمينياً واحداً مختلفاً، بينما

يملك الكلب 13 حمضاً أمينياً مختلفاً، وهكذا دواليك. وبينما تمسي الأنواع أبعد صلةً وارتباطاً، تتشعّب متواليات البروتين. وفي ظل وفرة هذا النوع من البيانات، يستطيع المُحلِّل أن يرسم شجرة، كشجرة العائلة، تربط جميع الأنواع بعضها ببعض.

في سبعينيات القرن العشرين، استخدم عالِم الأحياء الدقيقة الأمريكي كارل ووز (Carl Woese، 1928-2012) أحماضاً نووية بدلاً من البروتينات لتحديد العلاقات بين الكائنات الحية. فدرسَ الحمض النووي الريبي في الريبوسومات (ويُعرف اختصاراً بالرنا الريبوسومي)، انطلاقاً من فكرة أساسية بأنّ ذلك يمكِّنَ من تحليل جميع أشكال الحياة. فتخليق البروتينات، وهو وظيفة الريبوسومات، يُعدُّ الوظيفة الأساسية لأيِّ خلية. ومن ثمَّ يُفترض أن الجينات التي تُشفِّر الرنا الريبوسومي تَحَوَّرَت على مهلٍ بمرور الوقت، لأن غالبية طفرات هذه العملية كانت قاتِلة، ومن ثمّ فقد أخفقت في التراكم. إنّ نحو 60% من الوزن الصافي للريبوسومات قوامه الرنا الريبوسوميّ، والنسبة الباقية قوامها البروتينات. والريبوسومات في بدائيات النوى أصغر مما هي عليه في حقيقيات النوى، لكنها فيما عدا ذلك متشابهة من حيث البنية والوظيفة، ما يسمح بمقارنتها.

عَزَلَ ووز رنا ريبوسوميّاً صغيراً، وبالمقارنة بين أوجه الاختلاف في المتواليات النيوكليوتيديَّة، بنى «شجرة الحياة» (الشكل 7). وتُعْرَف بِنية التاريخ التطوّريّ للكائنات الحية بهذه الطريقة باسم «علم تطوُّر السلالات» (phylogeny). أحدثت شجرة ووز صدمةً لأن الحياة جُمعت في النطاقات الثلاثة السالف ذكرها، خلافاً لأنموذج «الممالك الخمس» الذي ضُمَّت فيه العتائق إلى البكتيريا. فضلاً عن ذلك، فقد خفّضت شجرة ووز رتبة النباتات والحيوانات والفطريات وساوتها بالأغصان في نهاية فرع حقيقيات النوى.

اليوم، بينما يَلقَى مفهوم ووز للنطاقات الثلاثة قبولاً على نطاق واسع، أثبتت دراسات جيناتٍ أخرى أنّ الشجرة ذات التحدُّر الرأسي من جيل إلى الجيل التالي له أبسط من اللازم. ويرجع ذلك إلى أنّ الميكروبات تتبادل الجينات عشوائياً (الشكل 4)، وأحياناً مع جينات أنواع غير ذات صلة بها، وهو ما يُعرف باسم الانتقال الجانبي (أو الأفقي) للجينات. ومن ثمَّ فإن الفروع الميكروبيّة لشجرة الحياة أشبه بـ «شبكة الحياة» التي تتقاطع معها انتقالات جينية جانبيّة.

منذ منتصف التسعينيات، أمسى تحديد توالي الدنا أكثر أتمتةً من ذي قبل. ولتحديد تسلسل جين وحيد من عيّنات بيئية، نجد أن العملية هي كالتالي: فصل الدنا من الخلايا ← نسخ (أو «تضخيم») جين الدنا عدة مرات باستخدام إجراء يُعرف باسم «تفاعل البوليمراز المتسلسل» ← استخلاص التوالي الجينيّ ← مقارنته بكائنات أخرى ← إنتاج شجرة تطوّر السلالات. ويتم تحديد توالي جينومات كاملة بشكلٍ متزايد، بما في ذلك الجينوم البشري الذي يحوي نحو 21 ألف جين مُشفِّر للبروتينات. ومن المدهش أن الجينات البشرية المُشَفِّرَة للبروتينات تغطي 1.5% فقط من 3 مليارات نيوكليوتيد. وبقية المتوالية دنا «غير مُشفِّر» أو «تافه». وهذه المصطلحات في حقيقة الأمر مُسمّيات مغلوطة لأن أجزاء عديدة من الدنا غير المُشفِّر تُنظِّم توقيت التعبير عن جينات بعينها (أي أنها تُنشئ البروتينات) أو تُشفِّر المنتجات غير البروتينية، مثل الرنا الريبوسوميّ.

تؤكِّد الاختلافات الكيميائية الحيوية الانقسام المفاجئ بين العتائق والبكتيريا الذي كشفت عنه الجينات. على سبيل المثال، تحتوي جدران الخلية البكتيرية على بوليمر يُعرف باسم ببتيدوغليكان (peptidoglycan) يتألف من عُصيَّات كربوهيدراتية ترتبط بالتقاطع بالبروتينات، بينما لدى جدران الخلية العتائقيّة تركيب كيميائي متنوّع للبروتينات أو الكربوهيدرات أو لكليهما. ولأغراض المقارنة، وُجِدَ أن جدران خلية حقيقيات النوى مصنوعة من السيليلوز في النباتات ومن مادة الكايتين (chitin) في الفطريات، ولا وجود لها في الخلايا الحيوانية التي لا تملك غشاءً وحسب. علاوة على ذلك، تتباين الليبيدات الغشائية لخلايا البكتيريا والعتائق. أولاً، هناك روابط كيميائية متباينة بين نهايات الدهون الفسفورية الكارهة للماء والنهايات الأليفة للماء. وثانياً، بدلاً من الليبيد الثنائي الطبقة ذي الأطراف الكارهة للماء المتدلية وجهاً لوجه في منتصف الغشاء، تملك العتائق جزيئات يتصل بعضها ببعض بالكامل. ويوفر هذا الاتصال قوةً، وهو من أسباب قدرة بعض العتائق على العيش في المياه الحارَّة جداً بوصفها كائنات محبّة للحرارة الشديدة. وهناك أيضاً تمايزات بيئية. فعلى سبيل المثال، لا يوجد كائن من العتائق يُعدّ عاملَ إمراض، ومن ثمَّ فإنك لن تصاب بمرضٍ من العتائق، بينما يمكن أن تقع صريع المرض بسبب العديد من أنواع البكتيريا.

ومن الاستخدامات الأخرى لعلم تطوّر السُلالات أن الاختلافات الجينيّة بين التصانيف يمكن أن ترتبط بالزمن التي تشعّبت فيه في التاريخ الجيولوجي، ما يصنع لنا «ساعة جزيئيّة». في ستينيات القرن العشرين، قارن إميل زوكركاندل (Emile Zuckerkandl) والكيميائي الحائز جائزة نوبل، لينوس باولنغ (Linus Pauling)، بين بروتيناتٍ لتصانيف كان معلوماً من الأحافير أنها تشعّبت من سلفٍ مشترك. واكتشفا أن عدد الفروق بين الأحماض الأمينية يتناسب مع الزمن المُنقضي. ثمة تفسير لذلك مفاده أن غالبية التغيّرات هي «طفرات محايدة» ليس لها أثر على اللياقة. وبالمثل، فإن عدد عمليات الإحلال النيوكليوتيدية في بعض متواليات الدنا تتناسب مع الزمن المنقضي. وتعمل الساعات الجزيئية بأفضل ما يكون عند التعاطي مع مجموعات الأنواع الوثيقة الصلة التي من الأرجح أن يكون لها معدلات طَفْرٍ مثيلة. وللأنواع ذات القرابة البعيدة أزمنة جِيليَّة ومعدّلات أيضيّة متباينة ومعدّلات تطفر متغايرة لا بد أن تُوضَع في الحسبان. واستناداً إلى الساعة الجزيئية، تُحدِّد نقطة المعايرة من السجل الأحفوريّ تاريخ سلفٍ بعينه في خوارزمية حاسوبية يتم تطبيقها على البيانات الجزيئية. وبينما نرجع إلى أزمنة سحيقة جداً، تَنْدُر الأحافير، فيصبح الأسلوب المُتَّبَع شاقاً. ومع ذلك، تشير الساعات الجزيئية إلى أن السلف الأخير المشترك للحيوانات عاش منذ ما يتراوح بين 780 و800 مليون سنة، وهي فترة مثيرة للفضول لأنها تسبق أقدم الأحافير الحيوانية.

ورغم تعقيدات الانتقال الجيني الجانبي، تُقَدِّم شجرة الحياة معلومات عن الحياة المبكّرة. فالكائنات الأليفة للحرارة (الميكروبات التي تزدهر في درجات الحرارة العالية)، التي تنمو عند درجات حرارة تتراوح بين 80 و110 درجات مئوية، عُثِرَ عليها قُرب جذر شجرة الرنا الريبوسوميّ في العتائق والبكتيريا (الشكل 7). وهناك استنباط منطقي مفاده أنّ آخر سلف مُشترك قد عَاشَ في بيئة حرارية مائية. والكائنات الحية القريبة من الجذر هي أيضاً ذاتية التغذية الكيميائية، ما يوحي بأن الميكروبات البدائية ربما اكتسبت الطاقة من مركّبات غير عضوية. وتُظْهِر الشجرة أيضاً أن الكائنات الحية المُعقدة - وأعني النباتات والفطريات والحيوانات - تأخّرت في تطوّرها، الأمر الذي يتسق مع السجل الأحفوري. وبالتالي، لو كان تطوّر سلالات الأرض دليلاً يسترشد به علم الأحياء

الفلكية، فإن المغزى الضمني واحد كالسجل الأحفوريّ؛ ألا وهو أنّ الحياة في مكان آخر يُفترض أن تكون ميكروبية في أغلبها طوال القسم الأكبر من تاريخ الكوكب المُضيف.

الحياة في البيئات القاسية

بعيداً عن تراكم الكائنات الأليفة الحرارة قُرْب السلف الأخير المُشترك، كانت تلك الكائنات نقطة انطلاق الأبحاث المعنية بـ «الكائنات الأليفة للظروف القاسية» (extremophiles). وهذه الكائنات تنمو تحت ظروف بيئية قاسية من منظورٍ بشري. في عام 1965، اكتشف عالم الأحياء الدقيقة الأمريكي توماس بروك (Thomas Brock) فتائل زهرية اللون لبكتيريا تعيش في درجات حرارة تتراوح بين 82 و88 درجة مئوية في منبعٍ حارّ تتصاعد منه الأبخرة في محمية يلوستون الوطنية الأمريكية. لم يكن أحدٌ يعلم في تلك الفترةً بوجود أيِّ حياة في درجة حرارة تزيد على 73 درجة مئوية، ومن ثمَّ أثار كشف بروك الاهتمام باستكشاف حدود الحياة.

ساعدت جهود بروك أيضاً - رغم أنّ ذلك جاء على غير المتوقّع - في إحداث ثورة في مجال الجينات. فقد اكتشف بروك بكتيريا جديدة تُعرف باسم المُستحرَّة المائية (Thermus aquaticus) في نبعٍ حارٍّ آخر. وعَزَلَ علماء الصناعة من هذا الميكروب إنزيماً مُستقراً عند درجات حرارة عالية يستطيع تحفيز تفاعل البوليمراز المتسلسل، وهو أسلوب استنساخ الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (لدنا) الذي أحْدَثَ ثورةً في علم الأحياء. وعليه، فإن العلم البَحْت - وهو ما نُطلق عليه علم الأحياء الفلكية في هذه الحالة - آل به المآل إلى أنْ عاد بالنفع والفائدة على المجتمع بشكل مفاجئ. واليوم، تُعدُّ تقنية تفاعل البوليمراز المتسلسل صناعة تُقدّر قيمتها بمليارات الدولارات. لكن بروك تَخلَّى عن دراسة البكتيريا المنسوبة إليه ولم يحصل على مليمٍ واحد.

في كثير من الأحيان، يقتضي نمو أليفات البيئات القاسية (ويُراد به الاستنساخ) ظروفاً قاسية أو مثالية. بالنسبة لدرجة الحرارة، فإن الحدّ الأعلى الذي تطيقه حقيقيات النوى هو 62 درجة مئوية، مقارنةً بالبكتيريا التي تتحمل حتى 95 درجة مئوية، والعتائق التي تعيش في بيئات تصل حرارتها إلى 122 درجة مئوية. ويَنْعم الكائن صاحب الرقم القياسي، وهو الميثانية النارية الكاندلرية (Methanopyrus kandleri) المُنتجة للميثان والمنتمية إلى العتائق، بنموّ أمثل في درجة حرارة 98 درجة مئوية.

ويشير تعريف العديد من أليفات البيئات القاسية (الإطار رقم 1) إلى أنّ الحياة موجودة في نطاق بيئات أوسع بكثير مما كان أيّ شخص يحسب منذ خمسين عاماً أنه ممكن، الأمر الذي يفتح المجال أمام احتمالات وجود حياة في بقاع أخرى سوى الأرض. على سبيل المثال، ربما تصمد أليفات الحرارة في أعماق سحيقة تحت سطح المريخ لأنها موجودة في أعماق سحيقة في قشرة الأرض. وثَمَّ مثال آخر يتعلّق بالحياة في بحيرة فوستوك (البالغة 250 كم طولاً و50 كم عرضاً و1.2 كم عُمقاً وتستقر تحت 4 كم من الجليد في شرق القارّة القطبية الجنوبية). ويُعتقد أنّ الجليد الموجود على ارتفاع 100 متر فوق البحيرة تَجَمَّدَ من مياه البحيرة. ومن الغريب أنها تحوي آثاراً لدنا أليفات

الحرارة الذاتية التغذية الكيميائية. ويوحي ذلك بأنه ربما كان تحت البحيرة المُتجمدة (عند درجة حرارة -2 مئوية بسبب الضغط العالي) مياه حرارية تحوي أليفات حرارة تنبع من الشقوق.

الإطار رقم 1 - أليفات البيئات القاسية

أليفات الأحماض Acidophiles: تتطلّب وسطاً حمضياً عند أسّ هيدروجيني (pH) يبلغ 3 أو أقل لكي تنمو وتتكاثر؛ وبعضها يتحمّل أساً هيدروجينياً دون الصفر.

أليفات القلويات Alkaliphiles: تتطلب وسطاً قلوياً ذا أسّ هيدروجيني أعلى من 9 لنمو مثالي، وبعضها يعيش في أسّ هيدروجيني يصل إلى 12.

أليفات الضغط العالي Barophiles (وتُعرف أيضاً باسم piezophiles): تعيش على نحو مثالي في البيئات ذات الضغط العالي، وبعضها يعيش في بيئات ذات ضغوطٍ توازي 1000 ضعف الضغط الجوي للأرض.

قاطنات شقوق الصخور Endoliths: تعيش داخل المساحات المساميَّة للصخور (البادئة «-endo» تعني «داخل»، واللاحقة «-lithos» تعني «الصخر»).

أليفات الملح Halophiles: تتطلب وسطاً ملحياً كي تعيش، تضارع ملوحته على الأقل ثُلث ملوحة ماء البحر (البادئة «-halo» تعني «الملح»).

كائنات تحت صخرية Hypoliths: تعيش تحت الصخور (البادئة «-Hypo» تعني «تحت»).

أليفات البرودة Psychrophiles: تنمو تحت 15 درجة مئوية، بينما ينمو بعضها عند درجات تصل بحد أدنى إلى -15 درجة مئوية، وثمة تقارير تفيد بنمو بعضها عند -35 درجة مئوية لأغراض الأيض.

ميكروبات مقاومة للأشعة: تقاوم الإشعاع المؤيِّن، مثل الذي يَصْدُر من المواد المُشعة.

أليفات الحرارة Thermophiles: تزدهر عند درجات حرارة تتراوح بين 60 و80 درجة مئوية، بينما تنمو أليفات الحرارة المفرطة نمواً مثالياً في درجات حرارة تتجاوز 80 درجة مئوية. ويمكن مقارنتها بأليفات الحرارة المعتدلة - مثل البشر - التي تعيش بين درجتي حرارة 15 و50 درجة مئوية.

أليفات البيئة الجافة Xerophiles: تنمو في وجود كمية محدودة جداً من الماء، وقد تكون من أليفات الملح أو قاطنات شقوق الصخور (البادئة «-xero» تعني «الجافّ»).

ويمكن تطبيق الأساليب التي نُقِّحت للكشف عن أشكال الحياة في بحيرات مثل بحيرة فوستوك بغية البحث عن حياة في أماكن أخرى في المجموعة الشمسية. وينطوي البحث عن عيّنات لأشكال الحياة في المحيط تحت السطحي لقمر المشتري - يوروبا - على تحديات مماثلة.

الفصل السادس الحياة في المجموعة الشمسية

الفصل السادس
الحياة في المجموعة الشمسية

ما العوالم التي يمكن أن تكون صالحة للسُكنى في عصرنا هذا؟

في عام 2002، بينما كنت أعكف على تدريس علم الأحياء الفلكية، عَرَضتُ على الطلاب جائزةً لمن يستطيع تخمين تسعة أجرام سماوية وصولاً إلى مدار كوكب بلوتو أظن أنها ربما تحوي حياة خارج الأرض (الجدول رقم 1)، ولم يَفُز أحد بالجائزة. لكن مع تزايد اكتشافات علم الأحياء الفلكية والمعلومات الإلكترونية، نال شخص ما الجائزة عام 2010. واليوم، ربما أضيفت عدة أجرام أخرى، لكننا سنتركها حتى نهاية الفصل الحالي.

إن نوع الحياة الذي أتناوله بالبحث في الجدول رقم 1 بسيط، إذ يشبه حياة الميكروبات، ومبدأه التوجيهي يتعلق بالماء السائل. فعلى سطح الأرض، حيثما وجدنا ماءً سائلاً عثرنا على حياة، سواء في الينابيع الحارَّة ذات الفقاقيع أو قطرات الماء الشديدة الملوحة داخل الجليد أو الأغشية المائية المحيطة بالمعادن في أعماق القشرة الأرضية.

ويغالي بعضهم إذ يفترضون أنّ ثمة حياة غريبة - ويعنون بذلك وجود كائنات حية لا تعوِّل على الماء - ربما كانت موجودة في البحيرات على تيتان، أضخم أقمار زُحل. لا تحوي بحيرات تيتان ماءً، وإنما موادَ هيدروكربونية سائلة، فتشبه بذلك بحارَ بترول صغيرة. وأشكال الحياة التي تستغل محلولاً هيدروكربونياً مجهولة، وهناك بعض الحجج المُستخلصة من الكيمياء الطبيعية - سأتناولها لاحقاً - تفيد بأن هذا النوع من الحياة ربما كان صعباً. في المقابل، لا شك أن الماء السائل يمكن أن يدعم الحياة.

الجدول رقم 1. تسعة أماكن ربما توجد عليها حياة اليومَ في المجموعة الشمسية. وتُقدَّر المسافة بينها وبين الشمس بوحدات فلكية، حيث تساوي الوحدة الفلكية المسافة بين الأرض والشمس، البالغة نحو 150 مليون كم أو 93 مليون ميل.

الجِرم	**نوع الجِرم ومتوسط المسافة بينه وبين الشمس**	**علة احتمال وجود حياة عليه**
المريخ	كوكب، 1.5 وحدة فلكية	ربما يحوي تحت سطحه جيوباً من الماء السائل
سيريس	أضخم كويكب، 2.8 وحدة فلكية	ربما يحوي تحت سطحه محيطاً
يوروبا وغانيميد وكاليستو	أقمار جليدية ضخمة للمشتري، 5.2 وحدة فلكية	ثمة دليل على وجود محيطات تحت أسطحها
إنسيلادوس	قمر زُحل الجليدي، 9.6 وحدة فلكية	ثمّة أدلة على وجود محيط أو بحر تحت سطحه، ووجود مواد عضوية
تيتان	أضخم أقمار زُحل، 9.6 وحدة فلكية	ثمة أدلة على وجود محيط تحت سطحه، ووجود مواد عضوية
تريتون	أضخم أقمار نبتون، 30.1 وحدة فلكية	ربما يحوي محيطاً تحت سطحه
بلوتو	جِرم ضخم ضمن حزام كايبر، 39.3 وحدة فلكية	ربما يحوي محيطاً تحت سطحه

أشعة الشمس وصلاحية الكواكب الداخلية للسُكنى

تتعلق احتمالات وجود ماء سائل على الكواكب الداخلية ـ عطارد أو الزهرة أو الأرض أو المريخ ـ من عدمه بدرجة الحرارة في الغالب، ومن ثمّ بالمسافة التي تفصلها عن الشمس (الجدول رقم 2). فالموقع تحديداً لا يجذب القاطنين وحسب، وإنما هو ضروري لصلاحية السُكنى الكوكبية.

الموقع ذو أهميته الخاصة لأن أشعة الشمس تنتشر في نطاق ذي مساحة سطح تزداد بزيادة مربع المسافة بين الكوكب والشمس. والإشعاع الشمسي هو القوة الكهربائية مُقدَّرَةً بالواط (كقوة المصباح الكهربائي) لضوء الشمس المُسَلَّط على كل متر مربع. وعند المسافة المدارية للأرض، المُقدَّرَة بـ 1 وحدة فلكية، تُوفِّر أشعة الشمس 1366 واط على كل متر مربع، أي ما يُكافئ نحو 14 مصباحاً كهربياً الواحد منها بقوة 100 واط. وعند مسافة 5 وحدات فلكية لكوكب المشتري، يُقَدَّر الإشعاع الشمسي بقيمة تقل 25 ضِعفاً لأن الطاقة ذاتها تنتشر على نطاق مساحة أكبر 25 مرة (5× 5 = 25). وبالنسبة لكوكب المريخ، الذي يبعد 1.5 وحدة فكلية، يَقِلُّ الإشعاع الشمسي بمقدار 2.25 مرة (1.5 × 1.5) عن الإشعاع الواصل إلى الأرض. وفي المقابل، يتلقى كوكب الزهرة، الذي يبعد 0.72 وحدة فكلية، إشعاعاً شمسياً يُقدَّر بنحو ضِعف الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض.

وكوكب عطارد، الذي يبعد عن الشمس مسافة 0.4 وحدة فلكية فقط، لا حياة فيه. وهو أصغر الكواكب الثمانية (إذ يبلغ قطره نحو خُمسيْ قُطر الأرض) ولا يحوي ماءً سائلاً، وربما لم يحوِ ماءً من قبل قط. واليوم، تصل درجة حرارة سطح عطارد القاحل أحياناً إلى 430 درجة مئوية. ولو كان لعطارد

الجدول رقم 2. الكواكب الداخلية للمجموعة الشمسية والعوامل التي تؤثِّر على صلاحية السُكنى فيها حالياً

	عطارد	الزهرة	الأرض	المريخ
متوسّط المسافة التي تفصل الكوكب عن الشمس (مُقدرة بالوحدات الفلكية)	0.4	0.72	1	1.5

متوسط درجة حرارة السطح (درجة مئوية)	167	462	15	-56
مفعول الدفيئة (درجة مئوية)	0	507	33	7
الضغط الجوي (بار)	0	93	1	0.006
حالة الماء السائل	مفرط الحرارة	ساخن أكثر من اللازم	موجود بوفرة	مفرط البرودة غالباً
الغازات الأساسية في الغلاف الجوي	لا هواء فيه	96.5% ثاني أكسيد كربون، 3.5% نيتروجين	78% نيتروجين، 21% أكسجين	95.3% ثاني أكسيد كربون، 2.7% نيتروجين

يوماً ما غلاف جوي، لتبدّد عن آخره عندما تشكَّلَ الكوكب بسبب جاذبيته المحدودة وأشعة الشمس الكثيفة الساقطة عليه.

وتُفَسِّر المسافة من الشمس السبب في أنّ الزهرة والمريخ غير مناسبين للحياة، لكن ربما هذه ليست القصة كاملةً. فسطح كوكب الزهرة، البالغة حرارته نحو 460 درجة مئوية، أكثر سخونة حتى من سطح عطارد، بينما كوكب المريخ صحراء مُتجمدة تُقدَّر درجة حرارتها بـ -56 درجة مئوية في المتوسّط. وحجم الزهرة قريب من حجم الأرض، لكن المريخ أصغر حجماً، إذ يبلغ حجمه نحو نصف قطر الأرض وتبلغ كتلته تُسع كُتلتها. والواقع أن الحجم الصغير للمريخ أفضى إلى سوء صلاحية السكنى عليه الآن، كما سيتجلى لنا لاحقاً.

ورغم أن الإشعاع الشمسي عامل واحد، يُحدِّد مفعول الدفيئة أيضاً درجات حرارة السطح على كوكبي المريخ والزهرة. ويمارس الغلاف الجوي للمريخ ضغطاً مقداره 0.006 بار فقط على سطحه، مقارنةً بالضغط الجوي على الأرض البالغ 1 بار. وهذا الهواء الرقيق مزيج جافّ من 95.3% ثاني أكسيد كربون و2.7% نيتروجين وغازات ثانوية. لا تنسَ عزيزي القارئ أنّ مفعول دفيئة الأرض يُقدَّر بـ 33 درجة مئوية. وبسبب رِقَّة الغلاف الجوي وجفافه، يُقدَّر مفعول دفيئة

المريخ بـ 7 درجات مئوية، ما يجعل الكوكب متجمّداً. والغازان الرئيسان في الغلاف الجوي للزهرة - ألا وهما ثاني أكسيد الكربون (96.5%) والنيتروجين (3.5%) - لهما نسبتان شبيهتان بنسبتيهما على المريخ. لكن على النقيض تماماً، نجد أنّ الغلاف الجوي للزهرة ثقيل جداً ويمارس ضغطاً كبيراً يقدَّر بـ 93 بار عند ارتفاع أرضيٍّ متوسط. ونتيجة لذلك، فإن مفعول الدفيئة يُقدَّر بـ 507 درجات مئوية، أي أكبر بخمسمئة درجة مئوية من أثره على المريخ (الجدول رقم 2). ومحصّلة ذلك أنّ سطحَي الكوكبَيْن لا يدعمان وجود الماء السائل. وفي الهواء الرقيق على كوكب المريخ، تغلي أيُّ بِركة (أو تتبخّر بسرعة) وتتجمّد في الوقت ذاته، ويوجد الماء عموماً إمَّا على هيئة جليد أو بخار فقط. وفي تلك الأثناء، يستحيل أن يتكوَّن الماء السائل على السطح الحارق لكوكب الزهرة.

ومن دون ماء سائل، يَعُدّ السوادُ الأعظم من علماء الأحياء الفلكية الزهرة كوكباً لا حياة فيه. ويعتقد قليلون أنّ الميكروبات الأليفة للأحماض ربما تعيش في سُحُبه المكوّنة من جسيمات حمض الكبريتيك. لكنني أشك في ذلك. فبعيداً عن نقص الماء، سيجذب الاضطراب الجوي الميكروبات إلى أسفل داخل جحيم الزهرة أو تدفعها إلى ارتفاعات شديدة الجفاف.

هل كان الزهرة مسكوناً في الماضي؟

ما زال كوكب الزهرة مثيراً للاهتمام من ناحية علم الأحياء الفلكية؛ لأنه ربما حَوَى في فترة من الفترات محيطات وحياة. ويُفترض أن حياته الأولى بدأت بوفرةٍ في الماء لأن كميات المواد المتطايرة الأخرى شبيهة بالمواد المتطايرة في كوكب الأرض. (والمواد المتطايرة هي مواد يمكن أن تصبح غازات عند درجات حرارة كوكبية سائدة). على سبيل المثال، إذا أخذت صخور الكربونات كلها الخاصة بكوكب الأرض وحوَّلتها إلى ثاني أكسيد كربون (CO_2)، لتَشَكَّلَ فوق الأرض ما يُعادل 90 غلافاً جوياً من ثاني أكسيد الكربون، مثل الزهرة بالضبط. وإذا استخلصت كل النيتروجين الموجود في المعادن على كوكب الأرض، وأضَفْتَه إلى الغلاف الجوي للأرض، فستحصل على ما يعادل نحو ثلاثة أغلفة جوية من غاز النيتروجين، ما يشبه مجدداً غاز النيتروجين في الغلاف الجوي للزهرة. ولأن تراكم الكويكبات المائية كان المصدر الأساسي للكربون والنيتروجين على سطح الزهرة والأرض، من المنطقي استنباط أنّ الزهرة اكتسب أيضاً كميات كبيرة من الماء منها، كما فعلت الأرض بالضبط.

ومن سوء الحظ أنّ الزهرة هَلَكَ بفعل قُربه من الشمس بسبب مفعول الدفيئة المنفلت. عندما تحرق أشعة الشمس الكوكب، من الممكن أن يصنع تبخير الماء غلافاً جوياً رطباً جداً لدرجة أنه يُمسي غير منفذ بالمرة للأشعة تحت الحمراء المنبعثة من سطح الكوكب. وعند هذه المرحلة، هناك حدٌّ لبرودة الكوكب بفعل انبعاث الأشعة تحت الحمراء إلى الفضاء، تُحدِّده خصائص الماء وجاذبية الكوكب. وتوحي الحسابات الأخيرة بأن حدَّ الجموح هذا يُقدَّر بـ 282 واط/م^2 للأرض وبأقل من ذلك ببضع وحدات من الواط للزهرة.

ولِفَهم حدِّ التفلّت، لنبحث فكرة تحويل الأرض إلى «زهرة». كما ذكرنا آنفاً، يُقدَّر الإشعاع الشمسي عند مدار الأرض بـ 1366 واط/م^2، لكن الأرض تعكس 30% من هذا الإشعاع، وتمتص منه 70% فقط. وبعد ذلك، يحدث نقص إضافي بنسبة 50% بسبب تعرُّض نصف الكرة الأرضية فقط لضوء النهار، ويُمثِّل النقصان الإضافي بنسبة 50% أخرى أشعة الشمس الساقطة بزاوية مُنْكسِرَة على سطح الأرض المنحني. وإذا جمعنا هذه العوامل كلها، فسنجد أن الأرض تمتص كمية من أشعة الشمس الصافية مقدارها (0.7 × 0.5 × 0.5) × 1366 = 240 واط/م^2. وعندما تكون الأرض مُستقرة، فإنها تُصْدِر الكمية نفسها من الطاقة إلى الفضاء في طيف الأشعة تحت الحمراء، وتحافظ على متوسّط درجة حرارة عالمي ثابت. ولكن، لنتخيل معاً لو تحرّكت الأرض إلى مدار الزهرة، حيث تتضاعف كمية أشعة الشمس المُمْتَصّة لكل متر مربع من 240 إلى 480 واط. حينئذ سيصبح المحيط حمّاماً ساخناً، وسيصل الغلاف الجوي المُشبَّع بالبخار إلى حد الإفلات الذي يمكن عنده انبعاث 282 واط/م^2 فقط إلى الفضاء. ومع زيادة كمية الطاقة الواردة لكل متر مربع (480 واط) عن الطاقة الخارجة (282 واط)، سترتفع حرارة الأرض أكثر فأكثر. وستتبخر المحيطات بالكامل، وستذوب صخور السطح. وعند هذه المرحلة، سيسطع الضوء القريب من طيف الأشعة تحت الحمراء من الغلاف الجوي العلوي الحارق باتجاه الفضاء، بحيث يعود التوازن لضوء الشمس الوارد والإشعاع الصادر، وتستقر درجة حرارة السطح عند نحو 1200 درجة مئوية. هذه العملية البشعة هي التي نعتقد أنها ألَمَّت بالزهرة. ولا بد أن جميع قاطني الزهرة احترقوا تماماً.

يؤدّي الانفلات أيضاً إلى تلاشي محيطات الزهرة. ففي الغلاف الجوي العلوي المنفلت، تُفَكِّك الأشعة فوق البنفسجية بخار الماء إلى هيدروجين وأكسجين. والهيدروجين خفيف جداً لدرجة أنه يفرّ إلى الفضاء ساحِباً معه الأكسجين، بينما يؤكسِد الأكسجين المتبقي الصخور الساخنة في الأسفل. وفي نهاية المطاف، تتصلب الصخور، ولكن بحلول تلك الفترة يكون الغلاف الجوي قد امتلأ بثاني أكسيد الكربون والنيتروجين المنبعثين من السطح الساخن. والمحصلة النهائية ستكون كوكب الزهرة الجهنمي كما نعرفه اليوم.

ربما ازدهرت الحياة في محيطات الزهرة قبل عملية الانفلات. لنتذكر معاً أنّ الشمس في مراحلها الأولى كانت أقل وضاءة. وبالتالي، ربما مرّت بضع مئات من السنين قبل أن تبدأ ظاهرة الانفلات. ومن سوء الطالع أنه ربما كان من الصعب إثبات ما إذا كانت هناك حياة على الإطلاق. في التسعينيات، خطَّطَ رادار على متن مركبة الفضاء «ماجلان»، التابعة لوكالة ناسا، سطح الزهرة. ووُجِدَ أنّ الأسطح الأقدم تحوي فوّهات أكثر، استخدمت كثافة فوّهات الارتطام لتقدير عُمر السطح الذي وُجِدَ أنه كان مُنتظماً منذ نحو 600 إلى 800 مليون سنة. ويبدو أن سطح الزهرة أُعيد تمهيده كله دُفعة واحدة بواسطة الصهارة. ومن الأسباب المحتملة لذلك أنه بينما تصدُر حرارة باطن الأرض باستمرار بخلق قاع بحر جديد، فربما تصاعدت الحرارة الداخلية للزهرة بشكلٍ دوري حتى أمسى باطنها شديد الحرارة لدرجة أن الصهارة تفجّرت في كل مكان. وربما أنّ الزهرة يتصرف بهذا النحو لأنه - خلافاً للأرض - لا يحوي ماءً لتشحيم الصفائح التكتونية.

كان الصعود إلى السطح مدمّراً لأيِّ أحافير. ومع ذلك، ربما بقيت آثارٌ جيوكيميائية طفيفة. وللتحقّق مما إذا كانت هناك حياة على كوكب الزهرة، فإن الخيار الأفضل هو جمع عيّنات من صخور

الكوكب والعودة بها إلى الأرض في بعثة فضائية مستقبلية.

المريخ المُشبَّع بالماء: أهو مكان للحياة؟

خلافاً للزهرة، تخيَّلَ كثيرون المريخ مكاناً محتملاً للحياة. وقبل عصر الفضاء، كانت هناك عوامل أساسية معلومة لدينا، مثل يوم المريخ الممتد 24.66 ساعة وعَامِه البالغ 1.9 عام أرضي وجاذبيته التي تبلغ 40% من جاذبية الأرض. ولم نكن نعلم يقيناً شيئاً عن سطحه حتى أول بعثة فضاء ناجحة قامت بها مركبة التحليق المنخفض «مارينر 4» التابعة لوكالة ناسا عام 1965. فقد كشفت هذه المركبة عن سطحٍ حافلٍ بالفوّهات كسطح القمر. ولقد أطاحت هذه المعلومة بآمال وجود حياة على المريخ. وبعد ذلك، وتحديداً في أوائل السبعينيات، التقطت مركبة ناسا المدارية «مارينر 9» أوديةً جافة لأحد الأنهار وبراكين خامدة، ما أوحى بأن المريخ كان في فترة من الفترات شبيهاً جداً بالأرض. ولكن سرعان ما انقلبت كفّة الميزان مجدّداً. فقد وصلت بعثة «فايكنغ»، التي تكوَّنَت من مركبتين مداريتين ومركبتي إنزال توأمتين، إلى المريخ عام 1976، وأخفقت في الكشف عن حياة، كما سنناقش لاحقاً.

وبعد فترة توقّفٍ في الثمانينيات، انبعث الاستكشاف من مرقده. ورسم الماسحُ الشامل للمريخ (Mars Global Surveyor)، الذي دار حول المريخ خلال الفترة من 1997 إلى 2006، خريطة للكوكب، والتقط صوراً للطبقات الرسوبية التي أوحت ضمناً بوجود العديد من الدورات الجيولوجية للتآكل والترسيب. وفي أوائل القرن الحادي والعشرين، اكتشفت المركبتان المداريتان «مارس أوديسي» و«مارس إكسبرس»، إضافةً إلى المركبة المدارية «المركبة المدارية لاستطلاع المرّيخ» (Mars Reconnaissance Orbiter)، مناطق من المعادن الصلصاليّة والأملاح التي ربما تكوَّنَت في الماء السائل. وحَطَّت مركبتا استكشاف المريخ التوأمتان (Mars Exploration Rovers) على سطح الكوكب الأحمر في عام 2004، واكتشفتا تموّجات مُتحجِّرَة من ماءٍ سائل سابق وصخوراً رسوبية، بينما حفرت مركبة الهبوط فينكس (Phoenix Lander) التابعة لوكالة ناسا الجليد تحت السطحي في منطقة قطبية، وقَاسَت أملاحاً قابلة للذوبان في التربة. وأخيراً، في عام 2012، سارت المركبة الجوالة كيوريوسيتي (Curiosity Rover) على مهلٍ نحو جبلٍ من طبقات الصخور الرسوبية يبلغ ارتفاعه 5 كيلومترات ويقع داخل فوهة يبلغ قطرها 150 كيلومتراً تُسمى «فوهة غيل» (Gale). وعثرت المركبة الجوالة على أحجار طينية ترسَّبَت من الماء تحوي عناصر الكبريت والفسفور والأكسجين والنيتروجين والكربون (الفصل الأول) الضرورية لقيام الحياة.

واليوم، ينصبُّ الاهتمام الفلكي البيولوجيّ بالمريخ على الآثار البيولوجية التي ترجع إلى مليارات السنين أو على أشكال الحياة الشبيهة بالميكروبات التي تحتمل الظروف البائسة تحت السطح. فقد حَلَّ اليومَ محلَّ الآمال المنعقدة على مريخٍ شبيه بالأرض، التي ميَّزَت عصر ما قبل الفضاء، واقعُ صحراء شاملة باردة تعصف بها الريح وتموج بها العواصف الترابية كشياطين ترابية يومية وتخلو من الأمطار.

إنّ سطح المريخ الحالي لا يناسب الحياة لثلاثة أسباب: أولها أنه رغم التأكّد من وجود الجليد، لم يُحَدَّد مكان أيّ ماء سائل على نحو لا يدع مجالاً للشك. والقلنسوتان الجليديتان قوامهما ثلج مائي يعلوه «جليد جاف» من ثاني أكسيد الكربون يزداد عندما يتجمّد نحو 30% من الغلاف الجوي عند القطب الشتوي. فضلاً عن ذلك، تستقر فوق خطوط العرض الوسطى التربةُ المُدعمة بالجليد أو «التُربة الدائمة التجمّد» تحت السطح مباشرةً. وفي المناطق الاستوائية، تزيد درجات حرارة فترة ما بعد الظهيرة في السنتيمتر العلوي من التربة على درجة التجمد، لكن الجليد يتحوّل هناك إلى بخار قبل الوصول إلى درجة حرارة الذوبان. والمشكلة الثانية تكمن في انعدام طبقة الأوزون، ما يسمح بوصول الأشعة فوق البنفسجية الضارّة إلى سطح الكوكب. وثالثاً، تنتج التفاعلاتُ الكيميائية في الغلاف الجوي فوق أكسيد الهيدروجين (بيروكسيد الهيدروجين)، وهي المادة الكيميائية ذاتها المُستخدمة في صبغ الشعر. وتستقر جزيئات فوق أكسيد الهيدروجين على السطح، حيث يمكنها إهلاك المواد العضوية.

ورغم أنّ سطح الكوكب ليس واعداً، قد تسمح الحرارة الجوفية بوجود الماء السائل والحياة. والواقع أنه بدءاً من عام 2004 أثارت تقارير معنية بالميثان الجوي، الذي بلغ في المتوسط 10 أجزاء لكل مليار جزء من حيث الحجم، حماسة تجاه احتمالات وجود مولّدات ميثان تحت أرضية. وبدا أنّ أشعة الشمس المنعكسة من المريخ، التي جمعتها المقاريب وبعثة «مارس إكسبرس»، تُظْهِر أن ميثان الغلاف الجوي قد امتصها. لكن مؤشّر الميثان لا يكاد يمكن تمييزه، وألقى بعض العلماء المشكّكين (وأنا شخصياً منهم) بظلال الشك على ما إذا كان الميثان موجوداً حقاً. ومن ثمَّ، أخفقت المركبة الجوّالة كيوريوسيتي في الكشف عن الميثان نزولاً إلى مستويات جزء واحد في المليار.

يشير علماء الأحياء الفلكية حين يناقشون الحياة الماضية إلى المقياس الزمني الجيولوجي للمريخ المُنقسم إلى دهور تُسمى «الدهر ما قبل النواتشي» (Pre-Noachian، قبل 4.1 مليار سنة) و«الدهر النواتشي» (من 4.1 إلى نحو 3.7 مليار سنة)، و«الدهر الهسبيري» (Hesperian، من 3.7 مليار سنة إلى 3 مليارات سنة) و«الدهر الأمازونيّ» (Amazonian، منذ 3 مليارات سنة). وتُصنَّف الأسطح على كوكب المريخ في كل دهر وفقاً للفوّهات الصدميَّة. فقد تراكمت فوق الأسطح الأقدم عُمراً فوّهات أكبر وأكثر عدداً. والواقع أنّ التواريخ المُحدِّدَة لكل دهر مستمدّة في حقيقة الأمر من القمر. فأعمار الصخور التي عاد بها روّاد فضاء رحلة أبولو معلومة عن طريق النظائر المُشعَّة، وتربط هذه النظائر كثافات الفوّهات القمريَّة بالتسلسل الزمني. والحسابات الفلكية التي تفسِّر وجود آثار ارتطام أكثر على سطح المريخ مقارنةً بالقمر تسمح بامتداد الصلة القمريَّة إلى المريخ.

إن الأدلة القائمة على احتمالات وجود ماء سائل في الماضي توحي بأنّ المريخ كان في فترة من الفترات أكثر صلاحية للسُكنى مما هو عليه الآن. وتُظْهِر الصور سمات نهريَّة (مرتبطة بالجداول المائية) في المشهد الطبيعي، بما في ذلك الأخاديد وأودية الأنهار الجافة والدلتات والقنوات الضخمة. علاوة على ذلك، تحوي التربة والصخور معادن تتكوّن في وجود الماء السائل.

الأخاديد شقوق يتراوح طولها ما بين عشرات ومئات الأمتار على جدران الفوهات والهضاب الواقعة بين خطَّي عرض 30 و70 درجة في نصفَيْ الكوكب الشمالي والجنوبي. ولأن الأخاديد

تفتقر إلى فوهات مُتراكبة، وأحياناً تتدفّق على الكثبان الرملية، فلا بد أنها حديثة جداً تاريخياً. كان يُعتقد في بداية الأمر أنها تتشكل عندما يذوب الجليد، لكن أظهرت الصور أنها تتشكل عندما يتبخر صقيع ثاني أكسيد الكربون، فيؤدي كما هو مفترض إلى تحرُّر دفقة جافة من التربة والصخور.

وشبكات الأودية سِماتٌ أقدم بكثير، وهي انخفاضات أرضية جافّة تماماً شبيهة بالأنهار تتشعّب على هيئة فروع أشجارَ ذات روافد (الشكل 8). وغالبيتها تشق طريقاً لها عبر أراضي الدهر النواتشي الحافلة بالفوهات، ويبلغ عرضها ما بين 1 و4 كم ويتراوح عمقها ما بين 50م و300م. وكثافة الروافد أقل بكثير من غالبية الأنهار الأرضية، لكنها عميقة بما يكفي لاستنتاج تصريف الأمطار أو مياه الجليد المنصهرة. وفي حالات أخرى، من الأرجح أنّ أوديةً ذاتَ روافد قصيرة تشكَّلَت بفعل النَحر عندما تسبّبت المياه الجوفية (المذابة) في تآكل الطبقة الأرضية الفوقيَّة وتداعيها. والقليل من الوديان ينتهي إلى دلتات.

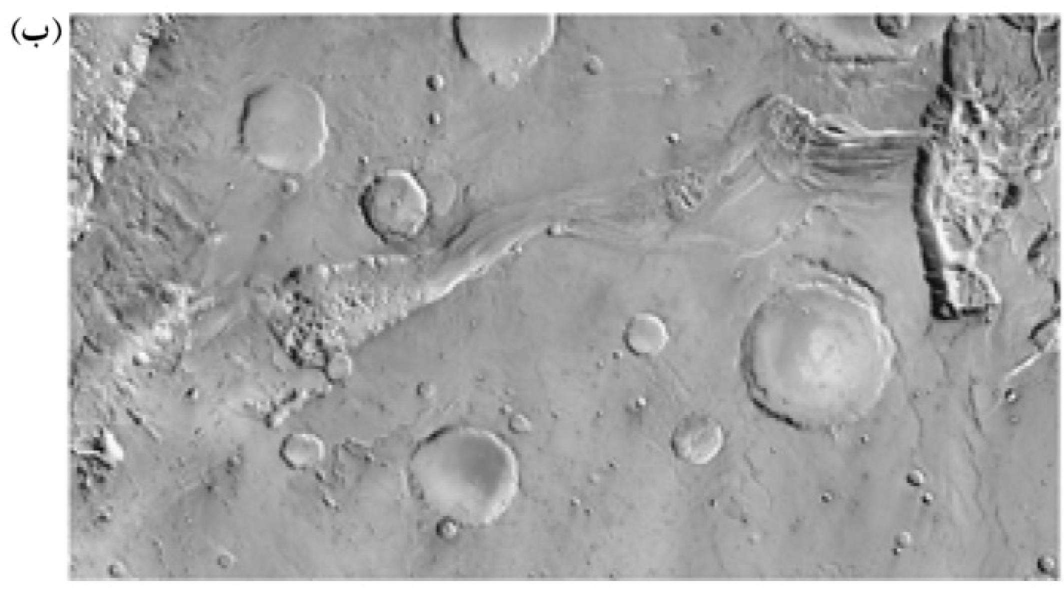
يتكوّن المشهد الطبيعي للدهر النواتشي من فوّهات ذات حوافّ متآكلة وقيعان ضحلة. والسبب في هذا التآكل غير واضح. إن شبكات الوديان محفورة في الطبقة العلوية، ومن ثمَّ فهي لم تكن مسؤولة عن ذاك التآكل. وعندما بدأ الدهر الهسبيري منذ 3.7 مليار سنة، شهدت معدّلات التآكل تراجعاً كبيراً، وأمست شبكات الأودية نادرة.

وقُرب نهاية الدهر الهسبيري (منذ نحو 3 مليارات سنة)، ظهرت قنوات التدفّق الخارجي (الشكل 8). وتتشكل القنوات من تدفّق السوائل المحصورة بين الضفاف، وتفتقر إلى الروافد وتنشأ من مصدر وحيد، خلافاً لأودية الأنهار. وقنوات التدفّق الخارجي ضخمة، إذ يتراوح عرضها ما بين 10 كم و400 كم، ويصل طولها إلى نحو 1000 كم، ويصل عمقها إلى بضعة كيلومترات.
وأغلبها يبدأ في منطقة ذات تضاريس فوضوية حيث تداعت الأرض، وأحياناً تتكوَّن داخل أخاديد أو شقوق توجد فيها أكوام من أملاح الكبريتات بحجم جِبال، والتي ربما كانت بقايا عملية تبخير من ماء مالح.

التفسير الرئيس لقنوات التدفّق الخارجي أنها تشكَّلَت من مياه الفيضان عندما ذاب الجليد الجوفي أو حينما انفجرت مستودعات المياه الجوفية. لكنها تقتضي تدفقاً أكثر 10 مرات إلى 100 مرة من أشهَر نظير أرضي لها، ألا وهي الأرض

(أ)

(ب)



8. (أ) شبكات أودية على سطح كوكب المريخ. توجد إلى اليسار الحافة اليسرى لفوهة هويغنز البالغ قطرها 456 كم. والصورة مُرتَكِزَة عند 14 درجة شمالاً و61 درجة شرقاً باتجاه الشمال. شريط مقياس المسافات = 20 كم؛ (ب) قناة التدفّق الخارجي رافي فاليس (0.5 درجة شمالاً، 318 درجة شرقاً) تمتد نحو 205 كم طولاً.

التي شقتها الفيضانات عبر الجزء الشرقي لولاية واشنطن الأمريكية التي أطلق عليها أوائل المستوطنين اسم «الأراضي الجرباء». ولقد تشكلت هذه الأراضي قُرب نهاية العصر الجليدي الأخير عندما أخذ سدٌ جليدي لبحيرة كبيرة في التداعي بشكل دوريّ.

ليس من السهل تفسير المياه الضرورية لإحداث تآكل في قنوات التدفّق الخارجي المريخيَّة. وتوحي التقديرات بمحيط عالميّ يبلغ عمقه عدة مئات الأمتار يتكوَّن من مياه أكثر بكثير مما يوجد الآن على هيئة جليد. وبما أنّ القنوات تتدفّق نحو الأراضي الشمالية الخفيضة، يُخمّن بعض العلماء أنّ محيطاً تشكَّلَ هناك. بالمقابل، تعتقد أقلية أنّ قنوات التدفّق الخارجي لم تُنحَت بفعل المياه وإنما بفعل الصُّهارة. وتوحي الكيمياء بأنّ صُهارة المريخ كان من المفترض أن تكون سائلة ومضطربة وأكّالة.

إلى جانب شبكات الأودية العتيقة وقنوات التدفّق الخارجي (لو كان الماء المسؤول عن التآكل)، تقدِّم لنا المعادن دليلاً آخر على مريخ أكثر رطوبة. يعلم الجميع كيف تتلاشى الأحرف الموجودة على شهود القبور القديمة بسبب التفاعلات الكيميائية مع الماء. وهذه التفاعلات تُغيِّر المعادن أو تُفككها فيما يُعرف باسم التجوية الكيميائية. وجزء كبير من سطح المريخ، شأنه شأن أسطح قيعان بحار الزهرة والأرض، مصنوع من البازلت، وهو صخر بركانيّ داكن اللون غني بسيليكات معدنَي الحديد والمغنيسيوم. وعندما يتعرّض البازلت للتجوية الكيميائية، تنتج معادن التحوُّل، مثل الطين بأنواعه. وعليه فإن وجود معادن التحوُّل يعني أنّ الماء السائل كان موجوداً، وأحياناً كان موجوداً بقلويةٍ محدّدة. على سبيل المثال، يميل الماء القلوي إلى إنتاج المعادن الطينية من البازلت.

لقد تم تحديد معادن التحوُّل المائية (التي تحوي ماءً) من تحليل الأشعة تحت الحمراء المنبعثة والمنعكسة من سطح المريخ، لكن تبيّن أنّ نحو 3% من أسطح الدهر النواتشي تحوي طيناً وكربونات مائية. وتهيمن معادن الكبريتات على مناطق أواخر الدهرَين النواتشي والهسبيري، بينما تشيع أكاسيد الحديد الجافّة على أسطح الدهر الأمازونيّ الأحدث. وقد يُفسَّر هذا النمط بثلاث حقب بيئية. في الحقبة الأولى، أدّت المياه القلوية أو المتعادلة القلوية إلى تجويَّة صخور البازلت وصنع الطين. وخلال الحقبة الثانية، استُخلص حمض الكبريت من غازات الكبريت البركانية، وصنع الكبريتات. وتستمرّ الحقبة الثالثة إلى يومنا هذا ببيئتها الباردة الجافّة وأسطحها الملونة بلون الصدأ.

حَطّت واحدة من مركبتي استكشاف المريخ التوأمتين، وتُدعى «أوبورتيونيتي» (Opportunity)، بالفعل على مقربةٍ من كبريتات الدهر النواتشي. كانت هناك كريّات يبلغ حجمها مليمتراً واحداً من أكسيد الحديد الأحمر (Fe_2O_3) مطمورة داخل طبقات الكبريتات، كالتوت الدفين في كعكة المافن. وحمَلَ أكسيد الحديد الأحمر المُترسِّب من المعادن ماءً ترسَّبَ تحت الأرض قبل نحو 3.7 مليار سنة. فضلاً عن ذلك، يبدو أنّ الماء الذي يصل إلى مستوى الكاحل تَجمَّعَ على السطح، تاركاً وراءه تموّجات في الطبقة الرسوبية. واكتشفت المركبة الجوالة الثانية، وتسمى «سبيريت» (Spirit)، أدلةً على وجود ينابيع حارّة قديمة على الجانب المقابل للكوكب.

الغلاف الجوي والمناخ القديمان للمريخ

تجعلنا الأدلة على الماء السائل نتساءل عمّا إذا كان المناخ على كوكب المريخ في بداية حياته دافئاً ورطباً. اختلف العلماء وانقسموا إلى معسكريْن. يحتج المعسكر الأول بأنّ مناخ المريخ كان دافئاً ورطباً لعشرات أو مئات الملايين من السنين. ويؤكّد المعسكر الثاني أنّ الذوبان العابر للجليد في مناخ بارد يمكن أن يفسّر ما نراه الآن.

والواضح أن السيناريو الأول أنْسَب للحياة، لكن من سوء الطالع أنّ أحداً لم يفسّر بَعْدُ كيف ظَلَّ المريخ في بدايته دافئاً ملايين السنين. فمنذ نحو 3.7 مليار سنة، كانت الشمس أضعف وهجاً بنسبة 25%. وكان الأمر يقتضي مفعولَ دفيئة يُقدَّر بـ 80 درجة مئوية لإبقاء المريخ في عمره المبكر فوق درجة التجمّد مباشرةً، مقارنةً بمفعول الدفيئة الحديث للأرض البالغ 33 درجة مئوية. ويُعتقد عموماً أنّ أيَّ هيدروجين جوي كان يُفترض أن يفرَّ إلى الفضاء بسرعة عندما تشكَّلَ المريخ، تاركاً الغلاف الجوي مُؤكسداً وحافلاً بثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. لم يستطع المريخ أن يحتفظ قط بغلافٍ جوي كثيف كذاك الذي يحيط بالزهرة لأن ثاني أكسيد الكربون كان يتكثّف ويتحوّل إلى جليد ويُشكِّل سُحُباً عند المسافة الفاصلة بين المريخ والشمس. والغلاف الجوي الكثيف الذي قوامه ثاني أكسيد الكربون بارعٌ أيضاً في تشتيت أشعة الشمس وإعادتها إلى الفضاء، الأمر الذي يساعد في تبريد السطح. ومن ثمَّ لا يمكن أن يوفِّر ثاني أكسيد الكربون مناخاً دافئاً مبكراً. وهناك اقتراح بديل بأنّ ثاني أكسيد الكبريت البركانيّ كان غازاً من غازات الدفيئة الأساسية. لكن ثاني أكسيد الكبريت يذوب في مياه الأمطار، وكان سيتلاشى من الغلاف الجوي لو أمسى المريخ رطباً. فضلاً عن ذلك، تصنع التفاعلات الجويَّة عند ارتفاعات عالية مُعلَّقاً دقيقاً من جُسيمات الكبريتات من ثاني أكسيد الكبريت، فيعكس ذلك المُعلّق أشعة الشمس ويُبَرِّد الكوكب. ولقد حدث هذا التبريد على الأرض بين عامي 1991 و1993 نتيجة الانبعاثات البركانية من جبل بيناتوبو في الفلبين.

ويقترح المعسكر الآخر وجود العديد من الآليات التي تسمح بوجود الماء السائل في مناخ بارد، ويشير إلى أنّ الارتطامات بَخَّرَت الجليد وحولته إلى بخار، الأمر الذي أدى بدوره إلى سقوط الأمطار التي نحتت أودية الأنهار. علاوة على ذلك، لعل التآكل نَتَجَ عن ذوبان الجليد المحليّ نتيجة لمزيجٍ عارض سابق من الميل المحوريّ للمريخ وشكل مداره. هذه الخصائص تضطرب بمرور الوقت بسبب أثر جاذبية الكواكب الأخرى. فميل محور كوكبٍ ما نِسبةً إلى المستوى المداري

للكوكب - مثل ميل محور الأرض البالغ 23.5 درجة - يتسبّب في اختلاف الفصول، لأن نصف الكوكب يتلقى كمية من أشعة الشمس عند نقطة واحدة في مداره أكبر من نصفه الآخر. وخلافاً للأرض، ليس لدى المريخ قمر كبير ليحقّق التوازن لمحوره (فلقمرَيه الصغيرين جداً أثر لا يكاد يُذكر)، وعليه فقد تباينَ ميلُ محور المريخ بين 0 و80 درجة على مدار الـ 4.5 مليار سنة الماضية. وعند ميول عالية، يواجه الجليد القطبي الصيفيّ الشمسَ ويتبخر. وتنقل تيارات الهواء البخار إلى المناطق المداريَّة الباردة حيث تتساقط الثلوج. ويمكن لضوء الشمس أثناء الفصول الأخرى أو عند ميول دنيا أن يُنتج ماءً سائلاً ويُفضي إلى تآكل الأنهار. ولعل الميول المعتدلة خلال ملايين السنين القليلة الماضية تُفسِّر المناطق الترابية المُتبقية عند خطوط العرض الوسطى التي عزّزها الجليد في فترة من الفترات. وأخيراً، يمكن أن تبقى المياه المالحة على المريخ سائلةً عند درجات حرارة أقل من الصفر بكثير. وعلى الأرض، نَنْثُر كلوريد الصوديوم على الطرقات الجليدية في فصل الشتاء لأنه يُذيب الجليد وصولاً إلى -21 درجة مئوية. وهناك ملح آخر - يُعرف باسم بيركلورات (perchlorate) - اكتشفته مركبة الهبوط «فينكس» في تربة المريخ على هيئة مغنسيوم أو كالسيوم في وسعه خفض درجة تجمد الماء إلى ما دون -60 درجة مئوية.

مهما تكن حقيقة المريخ في سنواته الأولى، فقد أفسد حجم الكوكب الصغير في نهاية المطاف صلاحيته للسُكنى. ونظراً لأن الأجسام الصغيرة أسرع تبرّداً من الكبيرة، فقد فُقِدَت الحرارة الداخلية بسرعة، ومن ثمَّ توقَّفَ النشاط البركاني الواسع النطاق. ومن دون النشاط البركاني، لم يستطع كوكب المريخ أن يعيد تدوير ثاني أكسيد الكربون، فترك ذاك الغاز يتحوّل إلى كربونات صارت، وهي موجودة ولكن ليس بالوفرة المتوقّعة لو تحوَّلَ غلافٌ جوي كثيف من ثاني أكسيد الكربون بالكامل. لذا بالإضافة إلى ذلك، يرجّح أن يكون جزءاً من الغلاف الجوي المبكر للمريخ قد أطلق مُبتعداً إلى الفضاء بفعل ارتطامات المذنبات والكويكبات الشديدة، في ظاهرة تُعرف باسم «التآكل الارتطاميّ». لقد كان الغلاف الجوي عرضةً للخطر بسبب الجاذبية الواهنة للمريخ. وإضافةً إلى الفرار الأكثر تدرجاً للغازات إلى الفضاء لاحقاً، فقد تُرِكَ المريخ في نهاية المطاف بغلافه الجوي الرقيق.

البحث عن الحياة على المريخ

ما برحنا لا نعلم ما إذا كان المريخ يحوي حياةً الآن أو ما إذا كان قد حوى حياةً قط في السابق، رغم محاولات العثور عليها. لقد حاولت مركبتا الهبوط «فايكنغ» الكشف عن حياة عام 1976، ومنذ التسعينيات بحث العلماء عن علامات على حياة سابقة في الحجارة النيزكية المريخيَّة.

أجرت كل مركبة هبوط من مركبتيْ «فايكنغ» ثلاث تجارب للكشف عن الأيض، وتجربة رابعة للبحث عن الجزيئات العضوية. وفحصت التجربة الأولى، وهي تجربة امتصاص الكربون، ما إذا كانت ميكروبات المريخ تحصل على الكربون من الهواء. لقد تعرّضت تربة المريخ (التي امتزجت أحياناً بالماء) لغازي ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وأول أكسيد الكربون (CO)، اللذين جُلبا من الأرض، مع الكربون-14، وهو نظير مُشع. وفي وقت لاحق، وُجِدَ أن التربة تحوي الكربون-14.

وعندما أجريت «تجربة حاكِمَة» عُقِّمَت فيها التربة عند درجة حرارة 160 مئوية، وُجِدَ أنّ التربة ما زالت تمتص الكربون-14، ما أوحى بأن الكيمياء غير العضوية هي المسؤولة عن هذه الظاهرة، لا الميكروبات المريخيَّة. والتجربة الثانية هي تجربة تبادل الغازات التي راقبت تربة المريخ ومحلولاً من المواد العضوية جُلِبَ من الأرض لمعرفة ما إذا كانت الغازات تنبعث من الأيض. ومن الغريب أن الأكسجين هو الذي انبعث، وانبعث أيضاً من تربة مُعقَّمَة. ومن الواضح أن المواد الكيميائية الموجودة في التربة تحلّلت إلى أكسجين بالماء أو الحرارة. أما بالنسبة للاستقصاء الثالث، ويُعرف بتجربة الإطلاق الموسوم، فقد أضاف مواد عضويةً تحوي الكربون-14 إلى التربة. لو استقلبت كائنات المريخ المواد العضوية، لانبعث منها ثاني أكسيد الكربون الذي يحوي الكربون-14. وانبعث غاز مُشِع، بينما لم ينبعث من التربة المُعَقَّمَة أيُّ غاز مُشِع. لقد كان ذلك كشفاً إيجابياً عن وجود حياة في ظاهره، لكن غالبية العلماء يعتقدون أن المواد المُؤكسِدة للتربة تتفاعل مع المواد العضوية لتصنع ثاني أكسيد الكربون، وأنّ الحرارة تُبطل مفعولها. وجاء سببٌ يدعونا إلى تفضيل هذا التفسير من التجربة الرابعة التي حدَّدَ فيها نوع من الأنف الإلكتروني يُعرف باسم «مطياف الكتلة بالفصل اللوني للغاز» (gas chromatograph-mass spectrometer) جزيئات تنبعث مُبتعدةً عن التربة المرتفعة الحرارة. ولم يعثر هذا المطياف على أيّ مادة عضوية في التربة بعد أن بلغ حدَّ كَشْفٍ يُقدَّر ببضعة أجزاء في المليار.

خلاصة القول إن الدرس المستفاد أنه قبل البحث عن أجرام خارج الأرض، عليك أولاً أن تستوعب الكيمياء غير العضوية للبيئة كي تتفادى المؤشّرات الإيجابية الكاذبة. وحقيقة الأمر أن هارولد «تشاك» كلاين (Harold "Chuck" Klein، 1921-2001)، الذي قادَ التجارب البيولوجية لبعثة «فايكنغ» الفضائية، أخبرني أنه أراد أن ينجز ذلك عندما وُضِع التصوّر العام لبعثة «فايكنغ»، لكن المديرين المسؤولين عن الشؤون المالية في وكالة ناسا أصرّوا على البحث عن الحياة مباشرة.

وبينما حظيت نتائج بعثة «فايكنغ» بالبحث والدرس في الثمانينيات، وَقَعَ اكتشافٌ مذهل. فقد اكتُشِفَ أنّ الأرض تحوي صخوراً من المريخ بالفعل. أحجار نيزكية مريخية! يبدو أن ثمة ارتطامات أطاحت بصخور من على سطح المريخ، فسقط بعضها على الأرض. والواقع أنّ 50 كيلوغراماً من الصخور تهبط على الأرض كل عام، وأغلبها يقع في المحيطات. وتُثْبِت الغازات المحبوسة داخل بعض الأحجار النيزكية أثناء انصهارها الطفيف المرتبط بالاصطدام الطارد وجودَ أصلٍ مريخيّ لأنها تضاهي الغلاف الجوي الذي قاسته مركبتا الهبوط «فايكنغ». وتحوي أحجار نيزكية مريخية أخرى خالية من غازات الحبيسة تركيبة نظير أكسجين ثلاثية (O^{16}، O^{17}، O^{18}) في معادن السيليكات المميّزة لجميع الأحجار النيزكية المريخيّة، وتمتاز بها كبصمة الإصبع. بحلول عام 2013، أمسى 67 حجراً نيزكياً مريخيّاً معلوماً، لكن القائمة ما زالت تزداد وتتسع.

في عام 1996، أفادت التقارير بعلامات محتملة على وجود حياة ماضية في تلال ألان 84001 (ALH84001). إن هذا الحجر النيزكيّ المريخيّ كان أول حجر (وهو ما يشير إليه الرقم «001») يُجمع في تلال ألان الواقعة في القارة القطبية الجنوبية (المعروفة اختصاراً بـ «ALH») في بعثة استكشافية عام 1984 (ومن ثمَّ كان الرقم «84»). لقد تبلور الحجر النيزكي ALH84001 على هيئة صخرة بركانيّة يبلغ عرضها 0.1 ملم تشكَّلَت منذ نحو 4 - 3.9 مليار

سنة، وبداخلها أربعة آثار محتملة للحياة: أحافير دقيقة مزعومة، وكربونات يقال إنها تَرسَّبَت بفعل الميكروبات، وآثار مواد عضوية تُعرف باسم الهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات (polycyclic aromatic hydrocarbons)، وهي مصنوعة من حلقات سُداسية من ذرات الكربون، وبلورات من أكسيد الحديد الأسود المعدني (Fe_3O_4) يُزعم أنها شبيهة بالبلّورات الموجودة داخل بكتيريا معينة. على الأرض، تصنع البكتيريا المُمَغنطة بلورات أكسيد الحديد الأسود داخل خلاياها بأشكال صَقَلها التطوّر وحوَّلَها إلى مغانط. وتستخدم تلك البكتيريا بوصلات أكسيد الحديد الأسود للتحرّك على طول المُكوّن الصاعد-الهابط للمجال المغناطيسي للأرض كي تجد حدّاً بين منطقة دُنيا محدودة الأكسجين بالأسفل ومنطقة عُليا غنية بالأكسجين، ما يساعد في تحسين الأيض.

وفي سنوات لاحقة، ألقت أبحاثٌ بظلال الشك على المزاعم الأربعة كلها. فالأحافير الدقيقة المزعومة هي بِنَى على هيئة قضبان تبدو شبيهة بالميكروبات لا أكثر. ومنذ ذلك الحين، اكتشف العلماء سطوحاً معدنية غير عضوية ذات أشكال شبيهة. علاوة على ذلك، فإن البِنى الموجودة داخل الحجر النيزكي ALH84001 أصغر عشر مرات من الميكروبات الأرضية، وربما كانت أقل من الحجم الأدنى الضروري للنشاط الكيميائي البيولوجي الضروري. ويمكن لسائل مُتبخر أن ينتج كربونات في الكُريّات، ومن ثمَّ ليس هناك سبب كافٍ لاستدعاء الأملاح البيولوجية المنشأ المُقترحة بوصفها الخاصية الثانية. وبالنسبة للدليل الثالث، فقد أظهرت التحليلات أن السواد الأعظم من الهيدروكربونات العطرية المتعدّدة الحلقات دخلت الحجر النيزكيّ بينما استقر في القارة القطبية الجنوبية لمدة 13 ألف سنة. فالهيدروكربونات العطرية المتعدّدة الحلقات ملوِّثات جويّة موجودة في كل مكان وتَنْتُج عن المواد العضوية المُحترقة. والأحجار النيزكية أجسام داكنة اللون تمتص أشعة الشمس بقوةٍ، لذا من الممكن أن تستقر داخل بِرَكٍ في جليد القارّة القطبية الجنوبية خلال فصول الصيف، ما يسمح للماء والمواد الكيميائية بالنفاذ إليها عبر شقوقها. ولو كانت هناك هيدروكربونات عطرية متعدّدة الحلقات مريخيَّة داخل الحجر النيزكي ALH84001، فيُحتمل أنها صُنِعَت بشكل غير عضوي. لقد ارتفعت درجة حرارة الحجر بفعل الارتطامات التي وقعت قبل الارتطام الذي قذفه في الفضاء. ومن المفترض أن يؤدّي التسخين إلى انبعاث غاز حامل للكربون من الكربونات يستطيع التفاعل مع الماء لصنع مادة عضوية بلا حياة. أما الحُجَّة الرابعة المعنيَّة بأكسيد الحديد الأسود (المغنتيت)، فقد اتضح أنّ نسبة دقيقة جداً من هذه المادة الموجودة في الحجر النيزكي ALH84001 ذات أشكال بيولوجية المنشأ. ويحتج بعض العلماء بأن أكسيد الحديد الأسود له أشكال متعدّدة، بما في ذلك أشكال شبيهة بالبكتيريا تشكَّلت أثناء الصدمات الحرارية التي سبقت القذف عندما تحلّلت كربونات الحديد إلى أكسيد حديد أسود.

يُظهر الجدل الذي يكتنف الحجر النيزكي ALH84001 مدى صعوبة إثبات وجود الحياة المجهرية في الصخور القديمة، لكن بما أن غالبية الصخور الأرضية تفتقر إلى أحافير، فإن غياب الحياة في الحجر النيزكي ALH84001 لا يعني أنّ الحياة على المريخ لم يكن لها وجود. وعلينا مواصلة البحث.

الكويكب سيريس: مرشّح قوي لصلاحية السُكنى؟

وراء المريخ وفي داخل مدار المشتري، يوجد حزام للكويكبات يتكون من ملايين الأجرام الصخرية الصغيرة، بما في ذلك أكبرها، ويُعرف باسم «سيريس»، البالغ قطره 950 كم، ويبعد 2.8 وحدة فلكية عن الشمس. ويحوي سطح سيريس معادن طينيّة وثلجاً مائياً. وكما هو الحال على سطح المريخ، يوحي الطين بوجود ماء سائل سابق. ثمة أنموذج رائد للبنية الداخلية للكويكب سيريس يتمثل في قلبٍ صخري محاط بقشرة من الجليد سُمكها 100 كم. وفوق القلب مباشرةً، ربما كان هناك محيط تحت سطحي. وقد يكون هذا المحيط مالحاً، ما يسمح باستمرار درجات حرارته دون الصفر، وربما تدفّق ذات يوم إلى السطح.

هل يمكن أن توجد الحياة داخل المنافذ المائية الحرارية في قاع محيط سيريس؟ إن سيريس صغير جداً لدرجة أنه لا يحوي حرارة داخلية الآن على الأرجح إلا قليلاً، ومن ثمَّ فأيُّ كتلة حيوية ستكون شحيحة جداً. ولكن، لعل سيريس كان أكثر صلاحيةً للسُكنى في الماضي. من المقرر أن تصل بعثة داون (Dawn) الفضائية لوكالة ناسا إلى سيريس عام 2015. ومن المفترض أن تمنحنا أطيافَ الانبعاثات تحت الحمراء وأشعة الشمس المنعكسة تفاصيل أكثر بخصوص تركيبة سطح الكويكب وصلاحيته للسُكنى.

أقمار غاليليو الجليدية التابعة للمشتري

يستقر وراء حزام الكويكبات كوكبُ المشتري الذي ربما لا يُعدُّ هدفاً واقعياً لعلم الأحياء الفلكية لأسباب سلف ذكرها في الفصل الخامس. لكن للمشتري 67 قمراً، ثلاثة منها ربما كانت صالحة للسُكنى. ولقد اكتشف غاليليو الأقمار الأربعة الأضخم في عام 1610، وهي آيو ويوروبا وغانيميد وكاليستو، على الترتيب بالاتجاه إلى الخارج من المشتري (الشكل 9). القمران آيو ويوروبا يشبهان قمرنا الأرضي من حيث الحجم، بينما لقمرَي غانيميد وكاليستو أبعاد شبيهة بأبعاد عطارد. والأقمار الثلاثة الخارجية لها تكوين داخلي صخري يغطيه الجليد، بينما السطح الخارجي للقمر آيو صخري وحسب. والأرجح أن يكون لآيو ويوروبا وغانيميد ألباب حديدية.



9. أقمار غاليليو التابعة للمشتري: آيو ويوروبا وغانيميد وكاليستو

يُعدُّ القمر آيو أكثر جرم سماوي تغطيه البراكين في المجموعة الشمسية بأسرها، إذ تلفظ البراكين ثاني أكسيد الكبريت الذي يتجمّد على سطح آيو. لكن آيو يخلو من الماء السائل ومن الحياة بكل تأكيد. وهو قمر بركاني الطابع جداً لأن قوى الجاذبية الصادرة من المشتري تتباين بينما يدور آيو حوله في مدار إهليجيّ، ضاغطاً على آيو مثلما يضغط على كرة تخفيف التوتّر. وهذا التسخين المَدِّي للقمر آيو ينشأ بسبب الاحتكاك عندما تتحرّك المادة الصلبة إلى أعلى وأسفل، على نحو ارتجاج الماء في حركة المد والجزر في محيطات الأرض. ويُجبَر مدار القمر آيو على أنْ يكون إهليجيّاً بسبب تأثير الجاذبية النابع من قمريْ يوروبا وغانيميد. وتُقدَّر الفترات التي تستغرقها الأقمار غانيميد ويوروبا وآيو لاستكمال دورة في مدارها بنسبة 4:2:1، ما يؤدي إلى تراصِّ تلك الأقمار بشكل دوريّ ودفع بعضها بعضاً بفعل الجاذبية. وتُعرف هذه العلاقة باسم «رنين لابلاس» (Laplace resonance) نسبةً إلى الرياضي الفرنسي بيير سيمون ماركيز دو لابلاس السالف ذكره في الفصل الثاني.

وللقمر يوروبا أيضاً مدار مجبور على أن يكون إهليجيّاً، ومن ثمَّ فهو يشهد تسخيناً مديّاً أيضاً. والتسخين الذي يتعرّض له أقل مما يتعرض له القمر آيو، لأن يوروبا أبعد عن المشتري. ويبلغ متوسط درجة حرارة السطح الجليدي للقمر يوروبا -155 درجة مئوية، لكن الحرارة المَديّة تستطيع الحفاظ على الماء السائل في أعماق سحيقة تحت الجليد. وتوحي كثافات الفوّهات الارتطامية بأن عُمر سطح القمر، الذي يتراوح ما بين 20 و180 مليون سنة، يتسق مع الوحل الجليديّ القادم من الأسفل الذي يُعيد تمهيد السطح. وتُظهر الصور منطقة تضاريس فوضوية، أي أسطح غير مستوية ذات كُتل تحركت من مكانها، ما يوحي بأن الجليد تحت السطحي ربما ينقل الحرارة. وتتضمن شبكة شاملة من الحزوز والتِلال خطوطاً انشق السطح عندها، وبدا أنَّ الجليد

انبثق منها. يوجد ملح كبريتات المغنسيوم على السطح، وربما نبع من الماء الموجود بالداخل، بينما أدت مواد مجهولة إلى ظهور خطوطٍ ضاربة إلى الحُمرة.

يُستخلص الدليل الأساسيّ على المحيط تحت السطحي للقمر يوروبا من القياسات المغناطيسية التي أجْرَتها مركبة غاليليو الفضائية التابعة لوكالة ناسا، التي دارت حول مدار المشتري خلال الفترة بين عاميْ 1995 و2003. وخلافاً للأرض أو المشتري، لا يُنتج الجزء الداخلي للقمر يوروبا مجاله المغناطيسي الأصيل الخاص به، لكن حين يمر القمر عبر المجال المغناطيسي العملاق للمشتري، تُستحثّ التيارات الكهربائية داخل يوروبا. وهذه التيارات بدورها تنتج مجالاً مغناطيسياً مُستحثاً واهناً ومتفاوتاً. وتقتضي قوة هذا المجال المغناطيسي وجودَ سائل مُوَصِّل للكهرباء في نطاق 200 كم من سطح يوروبا. والتفسير الأرجح هو وجود محيط مالح يبلغ حجمه ضِعْف محيطات الأرض. وتوحي كبرى الفوهات بأن الغطاء الجليديّ فوق المحيط يبلغ سُمكه 25 كم على الأقل. غير أن بعض التضاريس التي ترتفع عن السطح ربما نتجت عن جليد صاعدٍ ذاب على عمق بضعة كيلومترات تحت السطح ثمّ تجمّد مجدداً. وعليه، ربما وُجِدَت بحيرات ضحلة على شكل عدسات.

إلى جانب الماء السائل، يتوقّف احتمال قيام حياة على مصادر الطاقة والواجهات البينية ووفرة عناصر الكبريت والفُسفور والأكسجين والنيتروجين والكربون والهيدروجين. والأرجح أنّ يوروبا سيتمتع بمخزون كبير من العناصر البيولوجية المنشأ لو كان مصنوعاً من مادة تشبه الأحجار النيزكية أو المذنّبات الغنية بالكربون. فضلاً عن ذلك، من الممكن أن توفِّر التفاعلات المُصدِرَة للحرارة بين الماء وقاع البحر الصخري إمداداتٍ بالطاقة ومواد مُغذيَّة أيضاً. وربما تخلق الحرارة المُوَلَّدَة بالإشعاع، التي تنتج بفعل تحلل النظائر المُشعة داخل الصخور (مثل البوتاسيوم واليورانيوم والثوريوم)، منافذ حرارية في قاع البحار تَمُدُّ الكائنات الذاتية التغذية الكيميائية بثاني أكسيد الكربون والهيدروجين.

وقد تسمح وفرة الأكسجين في المحيط أيضاً بالأكسدة البيولوجية للحديد والهيدروجين في قاع البحار. وهناك مصدران صغيران للأكسجين. تصطدم الجُسيمات المشحونة الحبيسة في المجال المغناطيسي للمشتري بالسطح الجليديّ للقمر يوروبا، وتَكْسَر جزيئات الماء، فينبعث منها الأكسجين. وإذا ارتج الجليد بقوة، فمن الممكن أن يُحْمَل بعض الأكسجين إلى أسفل المحيط. وتنبع كمية أخرى من الأكسجين من جزيئات الماء المُنقسمة بفعل الإشعاع من العناصر المُشعة. وتتباين تقديرات الكتلة الحيوية للقمر يوروبا بين أقلّ من حجم الكتلة الحيوية للأرض بنحو ألف مرة إلى مليار مرة. بل إن بعض المتفائلين يعتقدون أنه ربما كانت هناك كمية كافية من الأكسجين لمخلوقات شبيهة بالحيوانات.

توحي قياسات المجالات المغناطيسية المُستحثَّة على قمريْ غانيميد وكاليستو أيضاً بوجود محيطات تحت سطحيّة ولكن على مسافات أعمق، تقل عن 200 كم لغانيميد و300 كم تقريباً لكاليستو. ويُقدَّر متوسط عُمر سطح غانيميد بنحو نصف مليار سنة، ومن ثمَّ فإن محيطه على الأرجح لم ينبثق إلى السطح مؤخراً. ولأن غانيميد أكبر أقمار المشتري، فإن جزءه الداخلي يدعم أشكالاً عالية الضغط من الجليد تستقر تحت المحيط. وعدم وجود واجهة بين الصخور والماء ربما كان أقل

مُلاءمة للحياة مما هو الحال على القمر يوروبا. ويوحي التسخين المَدّيّ الأقل على سطح غانيميد أيضاً بوجود كتلةٍ حيوية أصغر.

الاستدلال على وجود محيط تحت سطحي على القمر كاليستو مفاجِئ لأن هذا القمر يفتقر إلى التسخين المَدّيّ. ولا بد أنّ الدفء الذي يتمتّع به إشعاعيُّ المصدر، ولعل المحيط حافل بأملاح تخفِّض درجة التجمّد. ويبلغ عُمر سطح القمر كاليستو 4 مليارات سنة، ومن ثمَّ فإن فرص العثور على دليل على حياة محيطية هناك ربما كانت محدودة. فضلاً عن ذلك، في ظِل الطاقة الأقل المتوفرة، ينبغي أنْ تكون الكتلة الحيوية أقل مما هي عليه على القمر غانيميد.

إنسيلادوس وتيتان: قمرا زُحل الجليديان

يقع زُحل وأقماره البالغ عددها 62 قمراً على بُعد ضعف بُعد المشتري عن الشمس تقريباً. وأكبر أقماره التي اكتُشِفَت قبل عصر الفضاء هي كالتالي (من الداخل إلى الخارج): ميماس وإنسيلادوس وتثيس وديون ورِيا وتيتان وهايبريون وإيابيتوس وفوبي.

القمر إنسيلادوس له خصوصية لأنه يحوي نشاطاً جيولوجياً. وهو سادس أضخم أقمار زُحل، لكن قُطْره البالغ 500 كم تكاد بريطانيا العظمى تتسع له تقريباً. ويدور إنسيلادوس حول زُحل مرتين مقابل كل دورة يدورها القمر ديون حوله. ونتيجة لذلك، تُجْبِر الدفعات الدورية الناجمة عن قوة الجاذبية من ديون مدارَ إنسيلادوس على أن يكون إهليجيّاً، ما يسفر عن قوى جذب متفاوتة من زُحل تَلوِي القمر إنسيلادوس وتزيد من حرارته. ولأسباب ليست مفهومة بالكامل، يتركز التسخين تحت القطب الجنوبي لإنسيلادوس. وهناك، تنبعث جُسيمات ثلجية وغاز من شقوق متوازية تُعرف باسم «خطوط النمر» يبلغ طولها نحو 130 كم وعرضها 2 كم، وتُحاذيها تلال متطاولة. وتحوي التدفّقات النافثة آثاراً للميثان والأمونيا ومركّبات عضوية، فضلاً عن الملح. والواقع أنّ هذه التدفقات النافثة تَمُدُّ بالجُسيمات حلقة زُحل «E» التي يدور في مدارها القمر إنسيلادوس.

وللقمر إنسيلادوس لبٌّ صخري وقشرة جليدية وبحر جوفي تحت منطقة التدفّقات النافثة. إن الخليط العظيم المكوَّن من جزيئات عضوية وطاقة وماء سائل يوحي بأن الحياة ربما كان لها وجود داخل القمر إنسيلادوس. وهذه الحياة يمكن أن تكون لكائنات وحيدة التغذية الكيميائية، إذ كانت تقتات الهيدروجين الناتج عن التفاعلات بين الماء والصخور أو الهيدروجين والأكسجين المنبعثين من الماء الذي يتحلّل بفعل النشاط الإشعاعي. لو كان للحياة وجود هناك، لكان من الممكن أن يكون الميثان أو المادة العضوية الموجودة في التدفقات النافثة حيوية.

للقمر تيتان، وهو أكبر أقمار زُحل، أهمية فلكية أحيائية أيضاً. فهو شبيه من حيث الحجم بالقمر غانيميد وكوكب عطارد، وهو التابع الوحيد في المجموعة الشمسية الذي يملك غلافاً جوياً كثيفاً. والواقع أن ضغط الهواء على سطح تيتان يبلغ 1.5 بار، أي أكبر من الضغط الجوي على سطح الأرض بنسبة 50%. وغلافه الجوي الذي يتكون من 95% من النيتروجين و5% من الميثان

يكفل مفعول دفيئة مقداره 10 درجات مئوية، لكن ضوء الشمس عند المسافة الفاصلة بين زُحل والشمس أقل مئة مرة منه على الأرض، ومن ثمَّ فإن سطح تيتان قارس البرودة، إذ تصل درجة حرارته إلى -179 مئوية.

ويحتوي الغلاف الجوي للقمر تيتان على غمامة دخانية من الهيدروكربونات. وعند ارتفاع عالٍ، تُفكِّك أشعة الشمس جزيئات الميثان (CH_4)، وتبني التفاعلات اللاحقة الهيدروكربونات، بما في ذلك الإيثان (C_2H_6) والأسيتيلين (C_2H_2) والبروبان (C_3H_8) والبنزين (C_6H_6) وجُسيمات بُنيَّة ضاربة إلى الحُمرة تحتوي على هيدروكربونات عطرية متعددة الحلقات. وتُعرف هذه الجُسيمات باسم «الثولينات» (tholins)، وهي مشتقة من كلمة «tholos» الإغريقية ومعناها «موحل».

تترسّب المنتجات المُستخلصة من الميثان خارج الغلاف الجوي. والواقع أنّ نحو 20% من سطح تيتان مُغطى بالكثبان المدارية المصنوعة من جّسيمات بحجم الرمل مُغلفة على الأقل بمواد عضوية، إن لم تكن مصنوعة منها. وعند القطبين، تتكون أكثر من 400 بحيرة من أخلاط من البروبان السائل والإيثان والميثان، ولها شُطآن مذهلة قوامها جُسيمات البنزين والأسيتيلين.

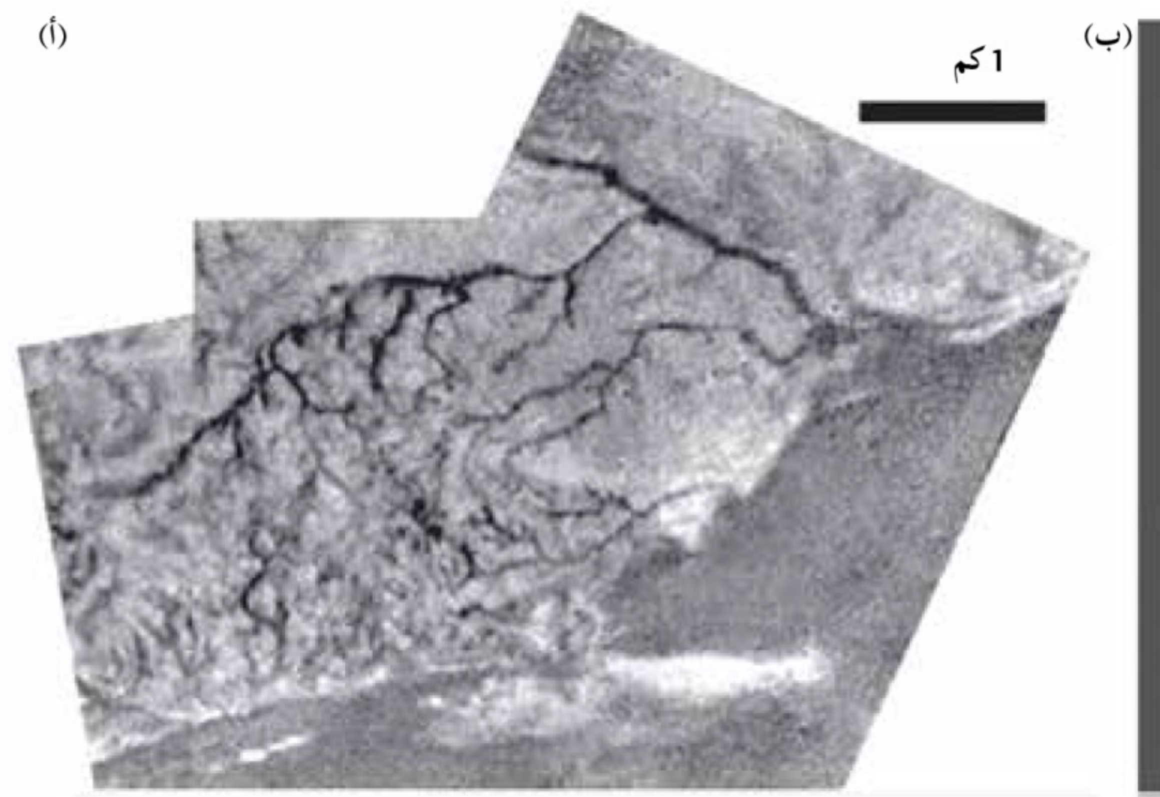
الميثان على تيتان كالماء على الأرض، فنراه يشكِّل سُحُباً وأمطاراً وأنهاراً. وأغلب معارفنا عن تيتان مُستقاة من بعثة كاسيني-هويغنز (Cassini-Huygens) التي وصلت إلى زُحل عام 2004. وحطَّ المسبار هويغنز على تيتان عام 2005، بينما كانت كاسيني مركبةً مداريةً تدور حول زُحل. وعلى مقربة من موقع هبوط هويغنز، كانت القنوات متآكلةً بفعل الهيدروكربونات السائلة (الشكل 10). وعند موقع الهبوط نفسه، استدارت الحصى (التي يُفترض أنها مصنوعة من الماء أو الثلج الجافّ) كما لو كان ذلك قد حدث بفعل انتقالها في أنهار من الميثان السائل. ويُفترض أن أمطار الميثان نادرة جداً، لكن عندما تُمطر فإنها تنهمر انهماراً.

ونظراً لأنّ أشعة الشمس تدمّر الميثان، فسيفرغ الميثان الموجود في الغلاف الجوي لتيتان في غضون فترة تتراوح بين 30 مليوناً و100 مليون سنة لو لم يتجدد ويَصِلَه المدد. وتُعدُّ الطريقة التي يتجدد بها الميثان لُغزاً عجيباً. والفرضية الأساسية مفادها أنّ الميثان يتسرّب من الجزء الداخلي لتيتان، ما يوحي بحركة جيولوجية داخله.

يلتوي تيتان التواءً شديداً جداً لدرجة أنه يستحيل أن يكون صلباً بالكامل، وهذا دليل على أن تيتان يحوي محيطاً جوفيّاً. وتضمن لامركزية مدار تيتان تعرّضه للانضغاط بفعل جاذبية زُحل. ويوجد محيط تحت قشرة جليدية يقل سُمكها عن 100 كم. ولكن، كما هو الحال مع غانيميد، ينبغي أن يكون قاع البحر من الجليد الكثيف لا من الصخور، لأن كتلة تيتان تسمح بأشكال الجليد العالية الضغط.

هناك نوعان من الحياة موجودان على القمر تيتان: حياة شبيهة بالحياة الأرضية في المحيط الجوفي، وحياة غريبة تنشأ في البحيرات الهيدروكربونيّة. بالنسبة للاحتمال الأول، عندما

(أ)



(ب)



10. (أ) شبكة من القنوات التي يبدو أنها تتدفّق في وادٍ على مقربة من موقع هبوط مركبة هويغنز؛ (ب) صورة للسطح عند موقع هبوط هويغنز. ويتراوح حجم الأحجار الموجودة في المقدمة ما بين 10 و15 سم، وتستقر فوق طبقة تحتية ذات حبيبات دقيقة أكثر دكنة.

تَكوَّنَ تيتان، كان من المفترض أن تخلق الحرارة المُنبعثة من اقتناص الأجسام الأصغر حجماً ماءً سائلاً على السطح بشكل مؤقَّت. ولعل الحياة القائمة على الماء تطوّرت وصمدت بينما انحسر المحيط تحت الأرض.

الحياة الغريبة انحصرت في التعقيد الكيميائي الحيوي لأن الأكسجين - النادر الوجود - ضروري للسكّريات والأحماض الأمينية والنيوكليوتيدات. ويقتنص تيتان بعض الجزيئات الحاوية للأكسجين من الفضاء، لكن كميتها ضئيلة جداً. والحياة الافتراضية في المذيبات الهيدروكربونية الباردة ربما تستغل الأسيتيلين لإمدادها بالطاقة. وعلى الأرض، يحترق الأسيتيلين مع الأكسجين في مشاعل اللحام. لكن الكائنات التي تعيش على تيتان تستطيع أن تستقلِب الأسيتيلين مع الهيدروجين من هواء تيتان. وتنتج طاقة عن التفاعل الكيميائي التالي:

C_2H_2 (أسيتيلين) + $3H_2$ (هيدروجين) = $2C_4$ (ميثان)

لكن هذه الفكرة تخيليَّة بحتة. والمشكلة الأساسية التي تعيب الحياة الغريبة على القمر تيتان في رأيي أنّ الهيدروكربونات السائلة ليست بارعة في تفكيك الجزيئات الكبيرة الضرورية للجينومات. إن الجزيئات الأكبر حجماً أقل قابلية للذوبان من الجزيئات الأصغر حجماً في الهيدروكربونات السائلة. فضلاً عن ذلك، تنخفض قابلية الذوبان عند درجات حرارة متدنية.

ربما كان لبعض الكواكب الخارجية هيدروكربونات سائلة كتلك الموجودة على القمر تيتان. وأشهر النجوم أقزام حُمر أصغر حجماً من الشمس وأبرد منها. والكواكب الخارجية التي تبعد وحدة فلكية واحدة حول تلك الأقزام تنحصر درجات حرارة سطحها في نطاق الهيدروكربونات السائلة، لا في الماء السائل. ومن ثمَّ لو اكتشفنا حياةً غريبة على تيتان، فربما نتخيّل كوناً يموج بالحياة يختلف كل الاختلاف عن كوننا. ومن قبيل المفارقة أننا سنكون حينئذ الحياة الغريبة ذاتها.

تريتون: جِرم محصور في حزام كايبر حول كوكب نبتون

في مدار نبتون وما وراءه على بُعد 30 وحدة فلكية، يُغطي الجليد النيتروجينيّ (N_2) الأجرام. وتريتون، وهو أكبر أقمار نبتون البالغ عددها 13 قمراً، وبلوتو هما في الحقيقة من أجرام حزام كايبر. وحزام كايبر منطقة من الأجرام الجليدية داخل مستوى المجموعة الشمسية التي تخلّفت عن نشوء المجموعة الشمسية، وتوجد على بُعد يتراوح بين 30 و50 وحدة فلكية. وهناك أيضاً أجرام لحزام كايبر متناثرة وصولاً إلى مسافة 1000 وحدة فلكية. وكان نبتون قد استقطب القمر تريتون لأن هناك سمتين تميّزان مداره توحيان بذلك: الأولى أن تريتون يدور في الاتجاه المُعاكس لدوران نبتون، ومستواه المداري مائل بمقدار 157 درجة نسبةً إلى خط استواء نبتون.

إن سطح تريتون شديد البرودة، إذ تصل درجة حرارته إلى نحو -235 درجة مئوية، لأنه يعكس 85% من أشعة الشمس. ويمارس الغلاف الجوي النيتروجينيّ الرقيق جداً لتريتون ضغطاً على سطحه يساوي 20 جزءاً من المليون بار. وهذا «الهواء» ببساطة هو بخار النيتروجين الذي يستقر على الجليد النيتروجينيّ عند درجة حرارة تريتون السائدة. وهناك أيضاً القليل من الميثان (نحو 0.03% من تركيز النيتروجين) الذي تتلفه الأشعة فوق البنفسجية لضوء الشمس، فتصنع دخاناً رقيقاً من جّسيمات الهيدروكربون. ولو وَقَعَ تدمير الميثان بالمعدل ذاته لمدة 4.5 مليار سنة، لكان من المفترض أن يتراكم ما يوازي عُمق متر من المادة العضوية. لكن الصقيع المُتحرّك سيغطي تلك المادة. وربما كانت الصبغة المائلة إلى الحُمرة التي خضّبت بعض الجليد أمارةً على المواد العضوية. والواقع أن أشعة الشمس تُبخِّر الجليد النيتروجينيّ أحياناً وتحوّله إلى أعمدة دخانية شبيهة بالينابيع الحارّة تحمل جُسيمات داكنة ربما كانت عضويَّة. وإلى جانب الجليد النيتروجينيّ، يشكل الثلج الجاف بعض أجزاء السطح.

تريتون نشط جيولوجيّاً لأن عدد الفوّهات يوحي بأن عودة ظهور المواد البركانية يرجع إلى 10 ملايين سنة فقط، وهناك بِنى جليدية أشبه بالمنافذ والشقوق والصهارة. ونَصِف هذه البنى بالبركانية الباردة، ما يعني أنها شَكْل من النشاط البركاني الذي يعادل فيه الثلج الذائب الصُهارة والحمم البركانية الذائبة. وتوحي كثافة تريتون بوجود لبٍّ صخري كبير يمدُّ النشاط البركاني البارد بحرارة إشعاعية المنشأ كافية، ويوفر محيطاً جوفياً من هيدروكسيد الأمونيوم.

ولعل القمر تريتون في بداياته كان أكثر صلاحية للسُكنى، وبعد استقطابه مباشرةً كان إهليجيّاً بشكل كبير، وأنتج تسخيناً مَديّاً من نبتون كان من المفترض أن يُذيب أي محيط جوفي شاسع. تميل حركات المَد إلى تدوير المدارات، ومدار تريتون في يومنا هذا أقرب ما يكون إلى الشكل الدائري. ومن ثمَّ بعد استقطابه، ازدادت القشرة الجليدية سُمكاً تدريجياً بينما تراجع التسخين المَدّيّ. واليوم، ربما استقرّ المحيط تحت طبقة جليدية يبلغ سُمكها مئات الكيلومترات، ووقع تحت أشكالٍ من الجليد عالية الضغط. ولكن، رغم أن الحياة المحيطيّة ربما كانت مُستترة في أعماق سحيقة، يوحي وجود النشاط البركاني البارد بأننا لو أخذنا عيّنةً من المادة العضوية الموجودة على السطح، فسيكون هناك احتمال أن نجد آثاراً للحياة.

هل يحوي بلوتو محيطاً جوفياً؟

يتكوّن سطح بلوتو، الذي سُمِّي تيمناً بإله العالم السفلي، من الجليد النيتروجينيّ في المقام الأول، وله غلاف جوي نيتروجينيّ رقيق ذو ضغط سطحي يتراوح بين 8 و15 ميكروبار. وهناك أيضاً القليل من الميثان الجوي الذي تدمّره أشعة الشمس كما يحدث على قمريّ تريتون وتيتان. ومرة أخرى، تنتج هذه الظروف جُسيمات هيدروكربونية تستقر، وربما تُشكل المناطق الداكنة على سطح بلوتو.

ويُعتقد أن ارتطاماً وقع بين بلوتو وأحد أجرام حزام كايبر فأسفر عن تكوُّن شارون، وهو قمر بلوتو الأكبر من بين أقماره الخمسة، في حَدَثٍ يناظر الارتطام الذي شكَّلَ قمر الأرض. وهكذا فإن بلوتو في واقع الأمر جرم مزدوج من أجرام حزام كايبر: القمر شارون يبلغ نصف حجم بلوتو وتُسْع كُتلته. وكل 6.4 أيام، يدور الاثنان حول نقطة تقع بينهما. وبعد الارتطام الذي أسفر عن تكوُّن شارون، كان من المفترض أن يُذيب التسخين المُدّيّ المحيط الجوفي على كوكب بلوتو. وربما كان لبلوتو لُبّ صخري يوفّر حرارة إشعاعية المنشأ كافية للحفاظ على محيطه الجوفي ذي المياه الغنية بالأمونيا اليوم.

الكائنات الحية في محيط بلوتو محدودة بالطاقة، ومن ثمَّ فإن الكتلة الحيوية ستكون أقل بكثير منها على القمر يوروبا. ومن الأرجح كذلك أن أيُّ محيط سيكون على أعماق تتجاوز 350 كم، وسيكون من الصعب الولوج إليه في أيِّ بعثة فضائية مستقبلية، لكن الحياة ربما كانت موجودة فيه.

ويُظهر بحثنا لكوكب بلوتو أنّ الحياة ربما كان لها وجود في أماكن مُستبعدة بالمرة، وقائمتي الواردة في الجدول رقم 1 ربما كانت مُغالية في التحفظ. فكثير من أجرام المجموعة الشمسية الخارجية الباردة كانت مُستبعدة بوصفها أماكن محتملة للحياة. لكن التصوّرات تغيّرت، ومن الممكن أن تكون هناك محيطات جوفية غنية بالأمونيا على قمر ريا التابع لزُحل، وقمريْ تيتانيا وأوبيرون، وهما أكبر أقمار أورانوس، وربما على بعض أجرام حزام كايبر الضخمة، مثل سِدنا (Sedna) الشبيه من حيث الحجم بكوكب بلوتو، لكنه يَبْعُد عن الشمس مسافة 100 وحدة فكلية. وبالنظر إلى أنْ كثيراً جداً من الأجرام في المجموعة الشمسية تُعدُّ أماكن محتملة للحياة، فإن مليارات الاحتمالات المماثلة قائمة بلا شك في شتى أرجاء مجرّتنا.

الفصل السابع عوالم نائية، وشموس بعيدة

الفصل السابع
عوالم نائية، وشموس بعيدة

البحث عن الكواكب الخارجية

اكتشف علماء الفلك فيما وراء المجموعة الشمسية ما ينوف على 3400 كوكب خارجي، بما في ذلك أجرام محتملة وأخرى مُؤكَّدَة. ومن السهل اكتشاف الأجرام الكبيرة، وعليه فجميع تلك الأجرام أكبر على وجه التقريب من الأرض، وبعضها عجيب نوعاً ما. فالمشتريات الحارّة كواكب بحجم المشتري تقع على بُعد 0.5 وحدة فلكية من نجومها الأم، وبعضها يدور في مداره بضعة أيام فقط. وهناك كواكب تبدو شبيهة بأرضٍ محمومة بالنشاط والحيوية، وتُعرف باسم الأراضي الهائلة (Super-Earths). وتبلغ كتلتها عشرة أضعاف كتلة أرضنا على أقصى تقدير. ورغم أنه من الصعب العثور على الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض، فإنها مسألة وقت وحسب قبل أن يمسي كثير منها معروفاً. فكم عدد الكواكب التي ستكون صالحة للسُكنى أو حتى مأهولة؟

بالطبع قبل أن تحدَّد كوكباً خارجياً «صالحاً للسُكنى»، عليكَ أن تعثر على كواكب خارجية أصلاً. وهذا البحث شاقّ في ظل المسافات الشاسعة التي ينطوي عليها، لكن الفلكيين طوّروا فئتين من طرائق البحث: الأولى - وتُعرف «بالاكتشاف غير المباشر» - تُعنى بالبحث عن خصائص نجميَّة، مثل الموقع أو الوضاءة، وتتأثر بوجود الكواكب الخفية. والفئة الثانية تُعرف باسم «الاكتشاف المباشر» لكوكبٍ بصورته أو بطيف ضوئه.

وطرائق الاكتشاف غير المباشر أربع: القياس الفلكي وإزاحة دوبلر النجمية (stellar Doppler shift)، والعبور، وأثر العدسة الثقالية المجهرية (gravitational microlensing). ويكمن مفتاح الطريقتين الأوليين في أنّ الكوكب والنجم يدوران حول مركز مشترك للكتلة. على سبيل المثال، لو كان لكوكبٍ ما ونجم ما الكتلة ذاتها بالضبط، فسيدوران في مدار نقطة تقع في منتصف المسافة بينهما. والواقع أنّ الكوكب أصغر من النجم، ومن ثمَّ فإن مركز الكتلة يكون أقرب إلى النجم وربما كان في داخله. لكن في جميع الحالات سيتبع النجم مداراً صغيراً حول مركز الكتلة و«سيتذبذب» حتى لو لم يكن في المستطاع رؤية كواكبه. في مجموعتنا الشمسية، يتسبّب مدار المشتري، الذي يستغرق الكوكب 12 عاماً ليقطعه، في ذبذبات لمدة 12 عاماً في موضع الشمس.

ويضيف زُحل ذبذبات صغرى لمدة 29 عاماً أخرى توازي مداره حول الشمس الذي يستغرق 29 عاماً.

وتقيس طريقة القياس الفلكي حركة النجم في السماء باستخدام المقاريب. وهذه الطريقة حسّاسة للكواكب الكبيرة البعيدة جداً عن نجومها، ومن ثمَّ يمكن توظيفها للبحث عن نُظُم كوكبية شبيهة بمجموعتنا. لكن عليكَ أن تنتظر عدة سنوات أو عقود لمراقبة آثار الكواكب البعيدة عن نجمها.

وتعتمد الطريقة الثانية - وهي إزاحة دوبلر أو السرعة الشُعاعية - على أنه عندما ينقسم الضوء إلى جميع ألوانه، يحوي الطيف شريطَين داكنَين أشبه بالرمز الشريطيّ. وتمتص العناصر الموجودة في الغلاف الجوي النجميّ الفوتونات المنبعثة من داخل النجم، ما يؤدي إلى ظهور خطوطٍ داكنة. وإذا تحرّك النجم نحو الأرض أو بعيداً عنها، تتحوّل تلك الخطوط إلى ترددات أعلى (أكثر زُرقةً) أو ترددات أدنى (أكثر حُمرة) على الترتيب. لقد شهد الجميع أثر دوبلر في الصوت. فعندما تدنو سيارة شرطة ذات صافرة إنذار صاخبة، تجتمع موجات الصوت على هيئة صرير عالي التردد، ولكن بعد مرور السيارة، تتحوّل الموجات الصوتية إلى ما يشبه صوت طائرة مسيَّرة منخفضة التردّد.
ويحدث تحولٌ شبيه في التردد مع الضوء. يُظْهِر تَحوُّل الخطوط الإيقاعي نحو اللونين الأحمر والأزرق في الطيف النجميّ أنّ النجم يتذبذب وأن هناك كوكباً يدور حوله. ويشير حجم التحوُّل إلى كتلة الكوكب، بينما تخبرنا وتيرة التحوّل بالزمن الذي يستكمل فيه الكوكب دورةً كاملةً في مداره.

في عام 1995، رصد ديدييه كيلوز (Didier Queloz، وكان حينئذ طالباً) ومُرشده ميشيل مايور (Michel Mayor) من جامعة جنيف أولَ كوكب حول نجمٍ شبيه بالشمس، باستخدام طريقة إزاحة دوبلر النجمية. وكان كوكباً ذا كتلة توازي نصف كتلة المشتري على وجه التقريب، يدور حول نجمٍ في كوكبة الفرس الأعظم كل أربعة أيام. كان الاكتشاف مفاجئاً تماماً؛ إذ لم يتوقّع أحد العثور على كوكب عملاق على مسافة قريبة هكذا (0.05 وحدة فكلية) من نجمه الأم لأن الكواكب العملاقة ليس من المفترض أن تتشكّل هناك. إننا نُدرك الآن أنّ بعض الكواكب خارج المجموعة الشمسية تشهد هجرة كوكبية في مرحلة مبكّرة من تاريخها (الفصل الثالث)، فينتهي الأمر بنا إلى رؤية ما صَمَدَ من عملية التدافُع. في عام 2012، أوحت بيانات إزاحة دوبلر باحتمال وجود كوكب له كتلة تضارع كتلة الأرض على بُعد 4.3 سنة ضوئية، يدور حول نجم رجل القنطور بي (Alpha-Centauri B). ويقع هذا الكوكب، إن وُجِدَ، على بعد 0.04 وحدة فلكية من رجل القنطور بي، وهي مسافة قريبة جداً لدرجة أن سطحه يتكوّن من صخر مُنصهر على الأرجح.

هناك عنصر دقيق يتعلق بطريقة إزاحة دوبلر وهو الطريقة التي ننظر بها إلى النظام الكوكبي. لو كان المدار في مواجهة النَاظِر (وهو ما يوصف بميلٍ بدرجات الصفر من مستوى مُتعامِد على خط الإبصار)، فلن تَظْهَر إزاحة دوبلر ذهاباً وإياباً. وكلما كان المدار أكثر ميلاً باتجاه حافته، ازدادت إزاحة دوبلر. وتصل إلى أقصى حدّ لها عند الميل باتجاه الحافة بزاوية 90 درجة. لا توجد وسيلة لمعرفة الميل غالباً، ومن ثمَّ ربما كانت إزاحة دوبلر المقيسة أقل من حالة الميل باتجاه الحافة المثالية، ما يسمح لنا فقط باستنباط كتلة كوكبية «دُنيا». إن طريقة إزاحة دوبلر تكون أكثر حساسية على الإطلاق مع الكواكب الكبيرة القريبة من نجمها، ولذلك كانت غالبية الكواكب الخارجية التي رُصِدَت في بداية الأمر مُشتريّات حارّة. لكننا نعلم الآن من طريقة العبور أنّ المشتريّات الحارّة في

حقيقة الأمر أقلية محدودة جداً من الكواكب الخارجية تتراوح نسبتها ما بين 0.5% و1% على وجه التقريب.

وتقيس طريقة العبور النقص في ضوء النجم عندما يعبر الكوكب أمام النجم، وهو ما يمكن أن يحدث لو حالفنا الحظ بما يكفي لنرى نظام كوكب خارجي فعلياً من حافته. إن مثل هذا الشكل الهندسي نادر من الناحية الإحصائية، لكن هناك عدداً كبيراً جداً من النجوم التي لو أطَلْنَا النظر إليها وحدقنا فيها بزاوية واسعة ولفترة كافية لرأينا أحداث العبور من أمامها. واستناداً إلى التراجع في ضوء النجم، من الممكن أن نُحدِّد قُطر الكوكب لو تسنى لنا تقدير حجم النجم. وفي المقابل، يمكن حساب مدة الدورة المداريّة للكوكب والمسافة الفاصلة بينه وبين النجم استناداً إلى دورة الخفوت. لقد كانت بعثة «كبلر»، التي أرسلتها وكالة ناسا، مقراباً يعمل منذ عام 2009 حتى عام 2013 من مدارٍ حول الشمس يراقب بلا انقطاع 145 ألف نجم في النسق الأساسي في كوكبة الدجاجة بحثاً عن عمليات العبور، إذ تقع غالبية النجوم على مسافة تتراوح بين 500 و3000 سنة ضوئية. وقد عَثَرَ كبلر على أكثر من 3200 كوكب خارجي مُرشح، تأكَّدَ وجودها كافة بالتحقّق من الخفوت الدوريّ أو باستخدام تقنية اكتشاف أخرى، مثل إزاحة دوبلر. وفي عام 2017، سيبدأ مقراب القمر الصناعي العابر لمسح الكواكب الخارجية بفحص مليونَي نجم بحثاً عن ظاهرة العبور.

الطريقة الرابعة غير المباشرة هي أثر العدسة المجهرية. فعندما يمر جسم ما بيننا وبين نجم بعيد، تتنبأ نسبية أينشتاين العامة بانحناء الضوء بفعل مجال جاذبية ذاك الجسم. ويعمل الجسم الأمامي بكفاءة عمل العدسة، فيُركِّز الضوء ويجعل النجم البعيد يبدو أكثر سطوعاً بشكل تدريجيّ. لكن لو دار كوكب ما حول نجم عدَسيّ، فمن الممكن أن يلمع النجم الذي في الخلفية أكثر من مرة. هذه الطريقة الحسّاسة يمكنها العثور على كواكب ذات كتلٍ مماثلة لكتلة الأرض عند مسافات مدارية تتراوح بين 1.5 وحدة فلكية و4 وحدات فلكية حول نجم ما. ومن سوء الطالع أنه ما إن يحدث التراصف، يُمسي من المستحيل عملياً المتابعة بقياسات أكثر تفصيلاً، لأن الأجسام عادةً ما تكون بعيدة جداً. غير أن أثر العدسة المجهرية يستطيع جمع الإحصاءات. والكواكب الكبيرة التي تجنح وحدها في الفضاء الفاصل بين النجوم يمكن أن تعمل أيضاً عمل الأجرام العدسيّة، ومن نتائج ذلك أنه يبدو أن هناك عدداً كبيراً من الكواكب المارقة التي تضارع المشتري من حيث الكتلة تحوم بين النجوم. وهذه العوالم الموحشة يُفترض أنها قُذفت من مجموعاتها الخارجة عن المجموعة الشمسية.

إن أهم الطرائق بالنسبة لعلم الأحياء الفلكيّة هي الاكتشافات المباشرة التي ترصد الضوء من كوكبٍ ما. والاكتشاف المباشر صعب لأنّ الكوكب جرم خافت يقع على مقربة من نجم أكثر سطوعاً بمراحل. ومع ذلك، فقد أنجزت المقاريب الموجودة في الفضاء، مثل مقراب هابل الفضائي، والمقاريب الضخمة جداً على الأرض الاكتشاف المباشر باستخدام مرسام الإكليل (جهاز مراقبة طفاوة الشمس)، وهو قناع لحجب ضوء الشمس. وكلمة «cronograph» مُشتقة من التقنيات التي استُخدمت في الأساس لحجب أشعة الشمس بغية دراسة هالة الشمس، وهي الهالة الرقيقة التي نراها في كسوف الشمس. وتَستخدِم المقاريب الأرضية أيضاً تقنية البصريات المكيفة، وهي إجراءات لاستشعار التشوّهات الناجمة عن وميض الغلاف الجوي للأرض.

يتمتع المقراب الفضائي بميزة تفادي التشويش الناجم عن الغلاف الجوي للأرض، لكن يبقى السؤال المتعلّق بتحديد الجزء الذي يتعيّن فحصه من الطيف. بشكل عام، تنبعث من الكواكب غالباً أشعة تحت حمراء، وتعكس ضوء النجم المنظور. لو تطلعنا إلى مجموعتنا الشمسية من مكان بعيد، لفاقت الشمس، بسبب سخونتها وكبر حجمها، الأرض سطوعاً بعشرة ملايين مرة تقريباً فيما يتعلق بالأشعة تحت الحمراء، وبعشرة مليارات مرة فيما يختص بالضوء المنظور. ومن ثمَّ فإن البحث عن أرض بعيدة في نطاق الأشعة تحت الحمراء يوفر تبايناً أفضل ألف مرة مما يتيح في الضوء المنظور. ومن سوء الحظ أنّ الضوء أيضاً ينتشر ويتشوّش (ينكسر) عندما يلتقي بأيٍّ جسم كالمقراب، ويتفاقم التشوّش بالأشعة تحت الحمراء أكثر من الضوء المنظور. ومن حسن الطالع أنّ ثمَّة تقنية تُعرف باسم «قياس التداخل» في وسعها أن تحجب الضوء غير المرغوب فيه. وتستخدم سماعات الرأس المانعة للضجيج المبدأ ذاته لكتم موجات الصوت غير المرغوب فيها.

لموجات الضوء قِمم وقيعان كأمواج المياه تماماً. يستخدم جهاز قياس التداخل الصفري (Nulling interferometry) أكثر من مرآة مقراب واحدة لمحاذاة موجات الضوء القادمة من نقطة ما في السماء بدقةٍ بحيث تُبطل قمم الموجات قيعانها، فيتحوّل الضوء إلى عتمة. وبهذه الطريقة، يمكن «إبطال» ضوء النجوم بغية رؤية الكواكب. ولقد دَرَسَت وكالة ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية مقرابَي الفضاء اللذَيْن يعرفان باسم «كاشف الكواكب الأرضية» (Terrestrial Planet Finder) و«داروين» (Darwin)، ويستخدِمان قياس التداخل لالتقاط صور وأطياف الكواكب الخارجية المحيطة بالنجوم القريبة الشبيهة بالشمس.

وتُظهِر نتائج مسح الكواكب الخارجية حتى تاريخه عموماً أنّ عدد الكواكب الخارجية يزداد كلما كانت كُتلها أقل، ومن ثمَّ فإن الكواكب الصخرية الشبيهة بالأرض يُفترض أن تكون شائعةً. وتسمح تقديرات كثافة بعض الكواكب الخارجية أيضاً بتقييم تكوينها. ولقد استُنبطت الكثافة باستخدام الكتلة استناداً إلى طريقة دوبلر، واستُنتج الحجم بطرائق العبور. فضلاً عن ذلك، لو كان لكوكبٍ عابر بحجم الأرض شقيق وحيد على الأقل شبيه بنبتون، فثمة طريقة تُعرف بـ «تباين توقيت العبور» تتيح معرفة كتلة الكواكب، ومن ثمَّ كثافتها. وحتى لو لم يعبر الكوكب الأكبر من أمام نجمه الأم نظراً لميله المداريّ، فمن الممكن أن يؤدي إلى تباينات طفيفة في توقيتات عبور الكوكب الأصغر تسمح بحساب كُتل الكواكب. وفي ظل قياسات الكثافة، تتوافر لدينا دلائل متزايدة بخصوص تحديد أيِّ الكواكب مصنوع من الغاز أو الصخور أو الماء أو من مزيج ما.

المنطقة الصالحة للسُكنى

عندما كنا نبحث إمكانية وجود حياةٍ في المجموعة الشمسية، ركزنا جُلَّ تفكيرنا على الأجرام التي تحوي ماءً سائلاً لأننا كنا على يقين من أن ذلك شرط لقيام حياة شبيهة بالحياة على الأرض، والفكرة ذاتها تنطبق على الكواكب الخارجية. وبينما تستحقّ الكواكب الجافة ذات المحيطات الجوفيَّة البحث والتقصي بمسابير فضائية داخل مجموعتنا الشمسية، فإنها لن تكون عموماً أهدافاً لعلم الأحياء الفلكيّة الخاص بالكواكب الخارجية. لا توجد احتمالات في المستقبل القريب لإرسال مركبة

فضائية إلى الكواكب الخارجية، ومن ثمَّ فإن كل شيء لا بد أن يتم بواسطة المقاريب التي تتفحّص الضوء من مسافة بعيدة. وبالتالي فإننا نهتم أكثر ما نهتم بالكواكب الخارجية التي تحوي ماءً سائلاً على أسطحها. هذه الكواكب لديها فرصة لوجود محيط حيوي يضخّ كميات كبيرة من الغازات في غلافها الجوي. ومن حيث المبدأ، من السهل رصد هذه الغازات الحيوية المنشأ في الضوء المنبعث من الكوكب، وربما كانت مؤشّراً على وجود حياة.

في عام 1853، لاحظ وليام ويويل أنّ المسافة الفاصلة بين الأرض والشمس سمحت بوجود ماء سائل بين منطقتين أُطلق عليهما ويويل اسمَي «المنطقة المركزية الحارّة» و«المنطقة الخارجية الباردة». وفي الخمسينيات، تحدّثَ أيضاً الفلكي الأمريكي هارلو شابلي (Harlow Shapley، 1885-1972) (الذي اكتشف أبعاد مجرّتنا) عن منطقة حول النجوم حيث يمكن أن تحوي الكواكب ماءً سائلاً على سطحها. لو كان كوكب ما نائياً جداً عن نجمه المستضيف له، فإنه يتجمّد تماماً، ولو كان أقرب من اللازم منه، فإنه يسخن جداً بما يستحيل معه وجود ماء سائل. واليوم، يشير مصطلح «المنطقة الصالحة للسُكنى» إلى المنطقة المحيطة بنجمٍ ما ويُحتمَل أن كوكباً شبيهاً بالأرض فيها حوى ماءً سائلاً في مرحلة زمنية ما. إننا نحدِّد وقتاً معيّناً لأنّ النجوم تشيخ وتسطع أو تخفت، ومن ثمَّ تتحرك المنطقة الصالحة للسُكنى. وفي مقابل المنطقة الصالحة للسُكنى، تُعدُّ المنطقة الصالحة للسُكنى باستمرار المنطقة المحيطة بنجم وفيها كوكب يستطيع أنْ يبقى صالحاً للسُكنى لفترة محدّدة ما، وعادةً ما تُضارع عُمر النسق الأساسي للنجم.

قُدِّرَ عَرْضُ المنطقة الصالحة للسُكنى حول أنواع مختلفة من نجوم النسق الأساسي، بما في ذلك الشمس. وتحدّد الحافة الداخلية بمدى تعرُّض الكوكب لمفعول الدفيئة المنفلت، بينما تحدَّد الحافة الخارجية عادةً بإخفاق الاحتباس الحراري حينما يتجمد ثاني أكسيد الكربون بالقدر الكافي الذي يسمح له بالتكثُّف على هيئة سُحُب من الثلج الجاف أو يتكثّف بما يكفي لتشتيت ضوء الشمس.
وكانت الحالة الثانية مشكلة محتملة للمريخ في بداياته (الفصل السادس). بالنسبة للشمس، تَبعُد الحافّة الداخلية للمنطقة الصالحة للسُكنى نحو 0.85 إلى 0.97 وحدة فلكية، بينما تبعد حافّتها الخارجية مسافة تتراوح بين 1.4 و1.7 وحدة فلكية. ويعكس الامتداد الآثار غير المؤكَّدَة لسُحُب الماء وثاني أكسيد الكربون عند الحدود الداخلية والخارجية تِباعاً. على سبيل المثال، قد تُبَرِّد السُحُب كوكباً دانياً إذ تعكس أشعة الشمس، ومن ثمّ ربما تبعد الحافّة الداخلية مسافة 0.85 وحدة فلكية بدلاً من 0.97 وحدة فلكية. وبالنسبة للحافّة الخارجية الأكثر تفاؤلاً، يستقر المريخ داخل المنطقة الصالحة للسُكنى. ومع ذلك، فإن حجمه الصغير أدى إلى تكوُّن غلافٍ جوي رقيق لا يستطيع الاحتفاظ بالماء السائل. وبتعبير آخر، لو كان المريخ كبيراً كالأرض، فربما كان صالحاً للسُكنى في زمننا هذا. لذا فإن حجم الكوكب مهم والمنطقة الصالحة للسُكنى لا تُخبر بقصة صلاحية السُكنى كاملةً، وإنما هي مؤشّر أولي لا أكثر.

وحَوْل نجوم أخرى، تكون المنطقة الصالحة للسُكنى أقرب أو أبعد استناداً إلى ما إذا كان النجم أبرد من الشمس أو أشد منها حَرّاً. على سبيل المثال، للنجم من نوع «K» الأبرد من الشمس (الشكل 1) منطقة ضيقة صالحة للسُكنى تمتد من مدار عطارد إلى مدار الأرض. والقزم الأحمر من نوع «M»، الأبرد حتى من النجم السابق، سيبعد مركز منطقته الصالحة للسُكنى مسافة 0.1 وحدة فلكية

على وجه التقريب، أي أنه سيقع بالضبط داخل نطاق مدار عطارد الذي يبعد مسافة 0.4 وحدة فلكية.

والواقع أن المنطقة الصالحة للسُكنى للأقزام من نوع «M» ضيّقة جداً لدرجة أن الكواكب ستشهد ظاهرة «التقييد المَدّيّ» الذي يحدث عندما تُحدِّد الجاذبية فترة دوران الكوكب. والظاهرة نفسها تجعل وجهاً واحداً للقمر يطلُّ على الأرض. فالقمر مُقيد مَديّاً ويدور حول محوره مرة واحدة لكل دورة مدارية حول الأرض. والمطابقة بين الفترات المدارية والدورانيَّة، وتُعرَف بالدوران المتزامن، ليست من قبيل الصدفة. إن القمر يستطيل استطالةً طفيفة في الاتجاه من الأرض للقمر، ولو انحرف هذا الاتجاه، لَثنت جاذبية الأرض نتوءات القمر المائلة وأعادتها إلى شكلها المتراص.

سيواجه الكوكب الدوَّار بشكل متزامن في المنطقة الصالحة للسُكنى لنجم قزم من النوع «M» أشعةَ الشمس من جانب واحد، بينما سيظل جانبه الآخر في ظلام دامس دائم. غير أن ذلك لا يجعل مثل هذه الكواكب غير صالحة للسُكنى. ورغم أن الجانب الليلي سيكون بارداً، فمن الممكن أن ينقل الغلاف الجوي الكثيف بشكل معتدل كمية كافية من الحرارة لتدفئة الجانب الليلي بينما يمكن أن يُبرِّد الغطاء السحابيّ جانبه النهاري. وفضلاً عن ذلك، ستسقط على القمر الكبير الذي يدور حول مثل هذا الكوكب أشعة شمس متباينة. لذا لا يُعدُّ التقييد المديّ في المناطق الصالحة للسُكنى للنجوم الأقزام من نوع «M» عائقاً أمام قيام الحياة. وهذا أمر مُبشِّر لأن النجوم الأقزام من نوع «M» هي أكثر أنواع النجوم شيوعاً، إذ تُمثِّل نحو ثلاثة أرباع إجمالي عدد تلك النجوم.

في السنوات الأخيرة، كانت الفرضيات التي تُحدِّد المنطقة الصالحة للسُكنى محل شك. فالحافّة الخارجية تتحدّد تاريخياً بتكثيف ثاني أكسيد الكربون، لكن بعض الكواكب الخارجية الصخرية الكبيرة ربما تملك أغلفة جوية سميكة وغنية بالهيدروجين. ونحن نعلم من دراستنا للقمر تيتان والكواكب العملاقة أنّ الهيدروجين والميثان يعملان عمل غازات الدفيئة، وأنهما يتكثّفان عند درجات حرارة أقل بكثير من ثاني أكسيد الكربون. وعند الحافّة الداخلية، قد لا يستسلم الكوكب الشحيح الماء، الذي يحوي بحيرات قطبية بدلاً من المحيطات، لمفعول الدفيئة المنفلت لأنه لا يملك كمية كافية من الماء لخَلْق غلاف جوي مُعتم بالكامل للأشعة تحت الحمراء. ومن ثمَّ ربما كانت المنطقة الصالحة للسُكنى أوسع مما نظن.

هل توجد منطقة مجرِّية صالحة للسُكنى؟

يرى بعض علماء الفلك أيضاً أن في المجرّة منطقة مثالية للنُظُم الكوكبية الصالحة للسُكنى تُعرف باسم «المنطقة المجرِّية الصالحة للسُكنى». ويقول هؤلاء إن الشمس تقع عند ثُلثي المسافة من مركز مجرّة درب التبانة، في حين أن النُظُم الكوكبية الواقعة على مقربة من المركز المأهول بكثافة تتعرّض للاضطراب بسبب المستعرات العظمى أو النجوم العابرة. وعلى الطرف الآخر، وُجِدَ أنّ النجوم الواقعة على مقربة من حافة المجرّة تفتقر بشدة إلى العناصر خلا الهيدروجين أو الهيليوم، وأنّ ذلك ربما يعرقل تشكُّل الكواكب. ولدى الفلكيين عادةٌ غريبة (تثير غثيان الكيميائيين!) إذ

يُسمون «جميع» العناصر - ما عدا الهيدروجين أو الهيليوم - «معادن»؛ ويُسمَّى المحتوى «المعدني» لأيِّ نجم «الخاصِّية المعدنيَّة» (metallicity). وتميل النجوم ذات الكواكب الخارجية العملاقة إلى أن تكون عادةً غنيةً بالمعادن، وبما أن الكواكب الخارجية العملاقة هي التي اكتُشِفَت أولاً، فقد اعتُقِدَ في بداية الأمر أنْ الخاصية المعدنية العالية ضرورية كي تتكوّن الكواكب في السديم. وفي فترة أكثر حداثة، لم يُعثر على أيِّ صلة بالخاصية المعدنية في النجوم التي تشبه كتلتها كتلة الشمس ولديها أراضٍ هائلة.

ثمة مشكلة أخرى تعيب المنطقة المجرّية الصالحة للسُكنى هي أن النجوم لا تمكث في مكانها. فقد أظهرت الأبحاث الأخيرة أنّ النجوم تجول عبر القرص المجرّيّ نتيجة تشتت الجاذبية بفعل الأذرع الحلزونية للمجرّة. وعلى أي حال، فإن جميع الكواكب الخارجية التي ستخضع للفحص والتقصي بحثاً عن علامات على الحياة في المستقبل القريب ستكون دانيةً، أي في نطاق مئة سنة ضوئية مِنّا. لذا أيّاً كانت صِحة فرضية المنطقة المجرِّية الصالحة للسُكنى، فإنها ليست بالفكرة العملية للبحث عن كواكب صالحة للسُكنى في أيِّ وقت قريب.

البصمات الحيوية أو الطريقة التي نعثر بها على الكواكب المأهولة

إن السؤال المحوري بطبيعة الحال يتعلق بما إذا كان في وسعنا العثور على حياة. في عام 1990، كانت مركبة ناسا الفضائية «فوياجر 1» على وشك الخروج من المجموعة الشمسية، وتَطَلَّعَت إلى الأرض من مسافة 6.1 مليار كم. وتُعرف الصورة الشهيرة التي التقطتها المركبة باسم «النقطة الزرقاء الباهتة»، وفيها بَدَت الأرض غاية في الدقة والصغر حتى بدت أقرب إلى «بِكسل» واحد مائل إلى الزُّرقة. لو لم نكن نعرف أيَّ شيء غير تلك الصورة، فما الذي يمكننا استنتاجه؟ لو قُلنا إنّ لون الكوكب كان مزيجاً من محيطات زرقاء وسُحُب بيضاء، لكان ذلك محض تخمين لا أكثر. فكيف يمكننا الارتقاء بتخميننا؟

لتحديد خصائص كوكب خارجي والبحث عن حياة بشكل عام، نحتاج إلى الطيف المرئي أو طيف الأشعة تحت الحمراء للكوكب. تمتصّ الجزيئات والذرّات المختلفة ترددات متباينة في الأطياف. وهكذا يمكننا البحث عن غازات الغلاف الجوي، مثل الأكسجين أو الميثان، التي يمكن أن تنتجها أشكال الحياة. وهذه السمات الكوكبية التي تشير إلى وجود الحياة هي البصمات الحيوية. والواقع أنه في العام ذاته الذي التقطت فيه المركبة «فوياجر 1» صورة «النقطة الزرقاء الباهتة»، حصلت المركبة الفضائية «غاليليو»، التي قصدت المشتري، على أطياف الأرض. وكان ذلك نوعاً ما تجربةً لرصد الكواكب الخارجية، وأثبت أنه في الإمكان رصد أكسجين الغلاف الجوي والميثان والمياه الغزيرة لكوكب الأرض. إن الوجود المتزامن للأكسجين والميثان دليل على وجود حياة لأن هذَين الغازَين يتفاعلان بسرعة أحدهما مع الآخر ما لم ينتِج المحيط الحيوي كميات كبيرة منهما، ما يحول من دون تحقق التوازن. ومن ثمَّ نقول إن الغلاف الجوي للأرض في حالة اختلال توازن كيميائي. وهذا هو نوع البصمة الحيوية الذي نريد أن نجده في الكواكب الخارجية.

لقد جُمعت بعض المعلومات بالفعل عن الأغلفة الجوية للكواكب الخارجية بدراسة أوجه الاختلاف في الأطياف عندما تمر الكواكب الخارجية العابرة من وراء نجم ما أو من أمامه. ويتضمن الطيف في العبور الأوليّ عندما يعبر كوكب ما من أمام نجم ما مرورَ الضوء العابر عبر حلقة من الغلاف الجوي حول الكوكب. ومن ثمَّ يمكن أن يعزل استقطاع طيف النجم وحده بعد عبور الكوكب طيفَ الغلاف الجوي للكوكب. ويمكنك بدلاً من ذلك أن ترصد الطيف عندما يكون الكوكب وراء النجم أثناء عبوره الثانوي، وتستقطع ذاك الطيف من طيف الكوكب وتضيف إليه طيف النجم عندما يستقر الكوكب إلى جوار النجم. ويُنتِج ذلك طيف الكوكب بأكمله. والواقع أن هذا الأسلوب استُخدم للحصول على الأطياف تحت الحمراء للمشتريّات الحارَّة بواسطة مقراب سبيتزر الفضائي (Spitzer Space Telescope)، الذي يدور حول الشمس.

في ظل وجود مقاريب أكثر تطوّراً وتعقيداً، نود أن نحدّد درجة حرارة سطح الكوكب الخارجي الشبيه بالأرض، وما إذا كان يحوي ماءً سائلاً. قد يتيح لنا الطيف هذه المعلومات، لكن قد لا تكون قادراً على رؤية شيء سوى الضوء المنبعث من قمم السحُب أو الغلاف الجوي العلوي. إنّ كوكب الزهرة مُستتر في الواقع بهذه الطريقة. وبالنسبة للكواكب الخارجية المحجوبة بشكل مماثل، سنحتاج إلى استنباط كمية غازات الدفيئة من نطاقات الامتصاص في الأطياف، ونحسِب درجة حرارة السطح. وبالترافق مع تكوين الغلاف الجوي للكوكب الخارجي، يمكنك بعد ذلك استنباط ما إذا كان الماء السائل موجوداً. وقد يكون من الممكن أيضاً البحث عن محيط ما عبر الوميض، وهو نقطة الانعكاس اللامع على مسطح مائي انسيابيّ عند زوايا السقوط المُتمِّمَة. وأخيراً، ينبغي أن نكون منفتحين على فكرة البصمات الحيوية المضادّة (anti-biosignatures). فأشكال الحياة الميكروبية ستلتهم بسهولة الهيدروجين أو غاز أول أكسيد الكربون، ومن ثمّ قد تُعَدُّ الوفرة من أيٍّ منهما بصمةً حيوية مضادّة لكوكبٍ ما في المنطقة الصالحة للسُكنى. والبصمات الحيوية المضادة أساساً توضح بأنه «ما مِن أحد في المنزل».

البحث عن ذكاء خارج الأرض

من الطرائق المختلفة للبحث عن أشكال حياة على الكواكب الخارجية افتراض أن ثمة حضارات تقنيّة موجودة. وإن وُجِدَت تلك الحضارات، ففي وسعنا البحث عن سبل التواصل معها. وهذا المسعى هو البحث عن ذكاء خارج الأرض، أو بشكل أعمّ، هو البحث عن بصمات تقنيّة.

في عام 1959، دعا غوزيبي كوكوني (Guiseppe Cocconi) وفيليب موريسون (Philip Morrison) إلى البحث عن بثٍّ لحضارات خارج الأرض باستخدام مقاريب راديويَّة ضخمة. ومنذ ذلك الحين، اقترح آخرون تَرَقُّب عمليات البث في الضوء المنظور. وهناك أسباب عملية تدعونا للبحث عن تلك الإشارات. على سبيل المثال، تُمتَص الأشعة السينية في الغلاف الجوي العلوي، بينما من السهل توليد موجات الراديو والضوء المنظور، ومن السهل رصدها عبر الفضاء. والسؤال المحوري المتعلق بالبحث عن ذكاء خارج الأرض يختص بما إذا كانت عملية البحث تستحق العناء أم لا. هل هناك حضارات كافية خارج الأرض؟

في عام 1961، وصف فرانك دريك (Frank Drake، وكان مُنتسباً آنذاك إلى جامعة كورنيل) طريقةً لتقييم عدد الحضارات المحتملة التي تبُثّ رسائل فضائية في مجرّتنا. لو قدَّرْنا متوسط عدد الحضارات التي تخرج «في بثٍّ حيٍّ» كل عام ومتوسّط أعمارها، فسيكون في وسعنا ضرب هذين الرقمَين لاستخلاص العدد الحالي للحضارات المُرسِلَة لرسائل فضائية. ولنضرب مثالاً على ذلك: إذا بلغ عدد طلاب السنة الأولى الجامعية نحو 6000 طالب سنوياً، وأمضوا أربع سنوات في المتوسط في الحرم الجامعي، فإن هذا يعني أن إجمالي عدد الطلاب الجامعيين في أيِّ فترة زمنية خلال تلك المدة هو 6000 × 4 = 24000 طالب. وذهب دريك إلى أبعد من ذلك إذ ابتكر ستة عوامل تُحدد عدد الحضارات الجديدة التي تبثُّ رسائلها وتَظْهر كل عام. باختصار، نقوم بحساب «د»، وهو عدد الحضارات المتواصلة، بضرب الأرقام الستة ومتوسط العُمر على النحو التالي:

عدد الحضارات (د) =

$$\underbrace{ر_{*} \times f_{\text{كوكب}} \times م_{\text{صالح للسُكنى}} \times f_{\text{حياة}} \times f_{\text{ذكاء}} \times f_{\text{حضارات}}}_{\text{عدد الحضارات المتواصلة التي تظهر كل عام}} \times \underbrace{ع}_{\text{متوسط عُمرها}}$$

وهذه هي معادلة دريك المشهورة. والرقم الأول (ر) يمثل معدّل ميلاد النجوم الملائمة لاستضافة حياة. ويرصد علماء الفلك نحو 10 نجوم جديدة سنوياً من النوع «G» و«K» و«M». والعوامل الأخرى كلها هي كالتالي:

$f_{\text{كوكب}}$: عدد كَسري يشير إلى تلك النجوم التي لديها كواكب

$م_{\text{صالحة للسُكنى}}$: متوسّط عدد الكواكب لكل نظام كوكبي صالح للسُكنى

$f_{\text{حياة}}$: عدد كَسري يشير إلى تلك الكواكب التي نشأت عليها الحياة وتطورّت

$f_{\text{ذكاء}}$: عدد كَسري يشير إلى العوالم المأهولة التي تطوّرت فيها الحياة الذكية

$f_{\text{حضارات}}$: عدد كَسري يشير إلى العوالم التي تطوّرت فيها حضارات قادرة على التواصل فيما بين النجوم

وأخيراً، «ع» هو عُمر تلك الحضارات المتواصلة.

إن كثيراً من عوامل المعادلة مجهولة، ولكن ما المانع؟ لنستخدم معادلة دريك على أي حال. توحي عمليات البحث الحالية عن الكواكب الخارجية بأن ثلثي النجوم كافة على الأقل لديها كواكب، ومن ثمَّ لنفترض أن $f_{\text{كوكب}}$ هو 2/3. إن البيانات المُستخلصة من بعثة كبلر ما برحت قيد التحليل، لكنها توحي بأن كوكباً واحداً على الأقل من بين 100 كوكب صالح للسُكنى، ومن ثمَّ لنفترض أن ($م_{\text{صالح للسُكنى}}$) = 1/100. سيتعين علينا ببساطة تخمين بقية العوامل كلها. لقد تطوّرت الحياة بسرعة على الأرض، ومن ثمَّ لنفترض أنّ الحياة نشأت على نصف الكواكب الصالحة للسُكنى، ومن ثمَّ فإن ($f_{\text{حياة}}$) = 1/2. ولنفترض أن كَسراً ضئيلاً من المحيطات الحيوية التي يتطوّر فيها الذكاء هو ($f_{\text{ذكاء}}$) = 1/8. ولنخمِّن أيضاً أنه في واحد من بين 10 محيطات حيوية تتطوّر حضارات قادرة على البث ما بين النجوم، ومن ثمَّ فإن ($f_{\text{حضارات}}$) يساوي 1/10. وأخيراً، فإن عُمر الحضارات المتواصلة (ع) هو محض تكهن اجتماعي، لكن لنفترض أنه يساوي 10 آلاف سنة. وعليه، كم عدد الحضارات المتواصلة الموجودة في مجرّة درب التبانة؟ الإجابة هي 4، وهي النتيجة المُستخلصة من المعادلة التالية: 10 × (2/3) × (1/100) × (1/2) × (1/8) × (1/10) × 10.000. حسناً، لكن هل يمكننا تقييد الاحتمالات بشكل أفضل؟

ستتوصّل دراسات الكواكب الخارجية في نهاية المطاف إلى العاملين الثاني والثالث في معادلة دريك، وربما كوَّنَت رأياً بخصوص احتمالية نشأة الحياة ($f_{\text{حياة}}$) لو رُصِدَت بصمات حيوية. ويَعتقد المتفائلون أنّ أيَّ كوكب يحوي ماءً سائلاً والمعادن الضرورية يستطيع استضافة الحياة بسهولة. والواقع أننا لا يمكن أن نجزم بذلك في الوقت الراهن.

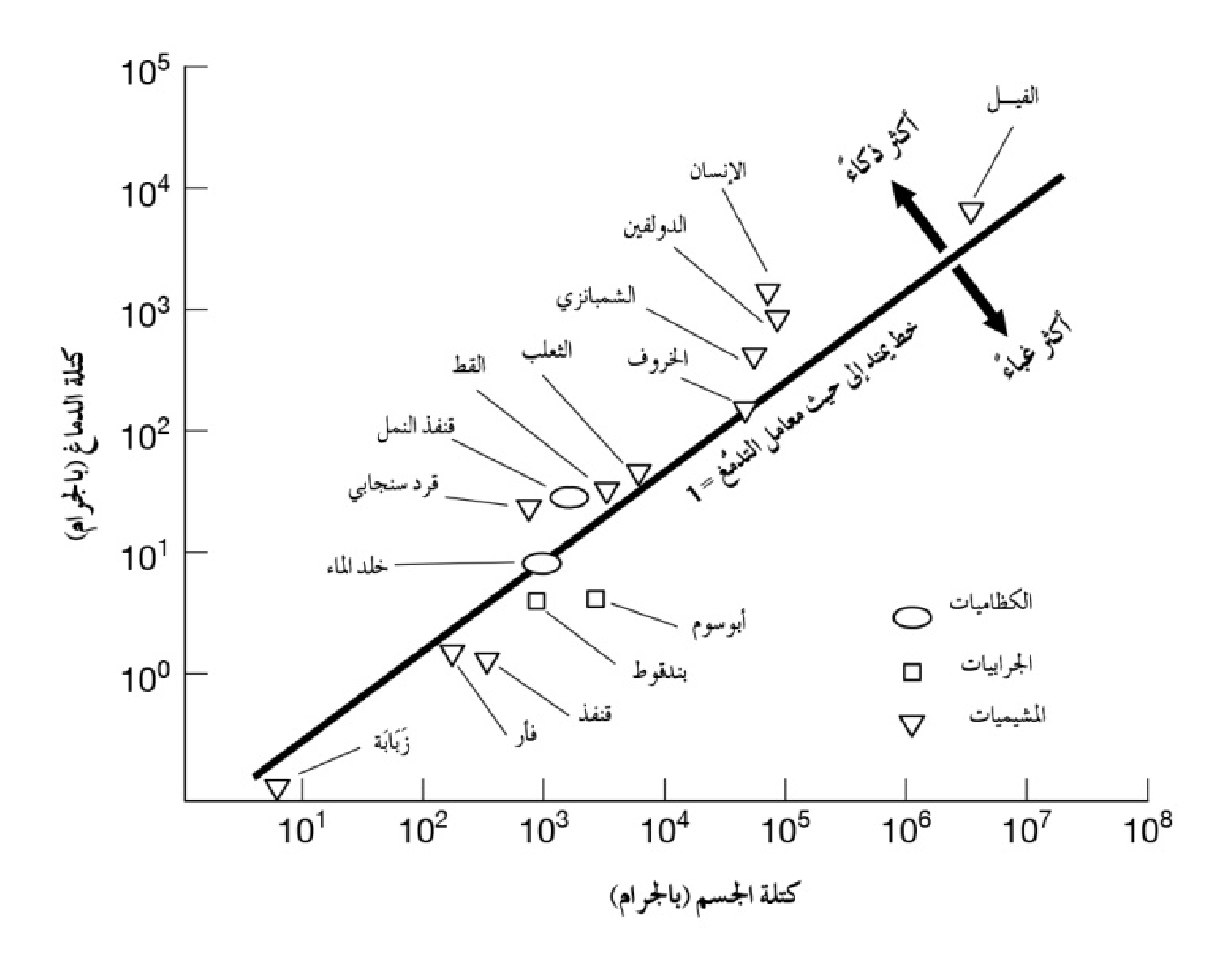
المصطلح التالي يتعلق بالذكاء، فما احتمالات حدوث ذلك؟ ربما تمثلت مشكلة وثيقة الصلة في أنّ بعض الحلول البيولوجية فقط هي التي تُجدي فيما يختص بحل مشكلات بعينها. في علم الحيوان، غالباً ما نجد الصفة ذاتها تشترك فيها كائنات حية في أنسال غير متصلة، وذلك نتاجُ ما يُعرف باسم «التطوّر التقاربيّ». ويحدث التقارب لوظائف ومكامن بيئية محددة. للوفاء بوظيفة الإبصار مثلاً، تطوّرت الأعين في أربعين مجموعة حيوانية مختلفة على الأقل. وحياة الكلب، من بين غيره من الكائنات، مثال على المكمن التقاربيّ. لقد اكتسب الذئب التسماني (المُنتمي لفصيلة الجرابيات) صفات شبيهة بصفات الكلب قريبة من الذئب المكسيكي (وهو حيوان ثديي مشيميّ). والتقارب التطوّريّ شائع جداً لدرجة أنه يعني أن الكائنات الحية التي لها أرجل وعينان، وأنظمة بيئية معينة، ربما كانت حتمية الوجود لأن هذه مجرد حلول جسمانية لمشكلات المشي والرؤية المُجَسَّمَة وشَغْل أماكن معينة.

وهناك جدل دائر بخصوص ما إذا كان الذكاء التقنيّ فريداً أم تقاربيّاً. لقد كان ظهور الذكاء التقنيّ وئيداً على الأرض، إذ اقتضى الأمر أربعة مليارات سنة كي تتراكم كمية كافية من الأكسجين تسمح بقيام حياة للحيوانات، ثم مرَّت بضع مئات الملايين من السنين قبل أن تظهر الحياة التقنيّة. وسادت الديناصورات نحو 170 مليون سنة، ومع ذلك لم نعثر على أيّ أمارة على التقنية، فلم نجد أدوات للتنقيب عن الأحافير ولا أفران مايكروويف. ومن ناحية أخرى، هناك بعض الأنسال التي بدا فيها أن الأدمغة لها قيمة وأنها شهدت نمواً. إن كتلة الدماغ بحدّ ذاتها مقياس عقيم للذكاء، لأن الجسم الكبير غالباً ما يحتاج إلى دماغ كبيرً لتشغيله. وبدلاً من ذلك، يُستخدم مُعامل التَدَمُّغ

(Encephalization Quotient)، وهو نسبة كتلة دماغ حيوان إلى كتلة دماغ حيوان عادي له كتلة البدن ذاتها. ومن ثمَّ فإن الحيوان التقليديّ يتمتع بمعامل تَدَمُّغ يساوي 1. والأرقام التي تتجاوز 1 تتحلى بالذكاء، بينما التي تقل عن 1 فهي أكثر تبلّداً وغباءً (الشكل 11). ويبلغ معامل ذكاء البشر 7.4 وقردة الشمبانزي 2.5، ما يعني أن لديها أدمغة أكبر مما هو متوقّع بهذه العوامل. وللأرنب معامل تدمُّغ يساوي 0.4، الأمر الذي سيروق لشخصية إلمر فاد (Elmer Fudd) الخيالية. وكما قال أرسطو: «لدى الإنسان أكبر دماغ مقارنةً بحجمه».

لقد اكتشف علماء الأحافير زيادةً في معامل التدمُّغ في أنسالٍ بعينها بمرور الوقت، وأشهرها على الإطلاق جنس الأناسيّ (*Homo*). على سبيل المثال، كان معامل التدمُّغ لدى الإنسان الماهر (*Homo habilis*)، وهو أحد أشباه البشر الذين عاشوا منذ نحو مليونَي سنة، 4 فقط. وفي فصيلة الحيتان ذات الأسنان (مثل الدلافين وحوت العنبر والحوت القاتل)، زاد معامل التدمُّغ منذ نحو 35 مليون سنة عندما اكتسبت تلك الكائنات القدرة على تحديد المواقع بالصدى كي تستطيع العثور على الأسماك والتعرّف على الأصدقاء. وربما كان «الأصدقاء» هم مفتاح السر. إن معدل الذكاء أكبر عموماً في الحيوانات الاجتماعية، إذ يبلغ 5.3 لدى الدلافين. والأرجح أن الذكاء يساعد في البقاء والحصول على قَرِين، ما يعزّز بدوره فرص التكاثر بقدر أكبر. لكن هناك جدلاً واسعاً حول الضغوط التطورية الكامنة وراء الذكاء.

وهناك مسألة أخيرة تتعلق بالبحث عن الذكاء خارج الأرض تُعرف باسم «مفارقة فيرمي» (Fermi Paradox) التي ابتكرها إنريكو فيرمي (Enrico Fermi، ا1901-1954)، الفيزيائي الحائز على جائزة نوبل، وهو الذي بنى أول مفاعل نووي في العالم عام 1942. لقد نشأت فكرته من محاورة دارت على الغداء. يرجع تاريخ النجوم الموجودة في قُرص مجرّة درب



11. كتلة الدماغ والجسم لبعض الثدييات المختلفة. تتمتع الحيوانات الموجودة إلى يسار الخط القُطريّ بكتلة دماغ أكبر من المعتاد.

التبانة إلى 9 مليارات سنة، بينما يُقدر عُمر الأرض بـ 4.5 مليار سنة فقط. ومن ثمَّ لو كانت الحياة الذكية شائعة، لنشأت العديد من الحضارات التقنيّة قبلنا بفترة طويلة. وعلى فرض أنها تطوّرت حتى بلغت آفاق السفر في الفضاء (أو الروبوتات الذاتية الاستنساخ التي تقوم بالرحلات الفضائية نيابةً عنها)، فمن المفترض أن تكون تلك الحضارات قد انتشرت في شتى أنحاء المجرّة الآن. وعليه، سأل فيرمي قائلاً: «أين هم؟»

ولمفارقة فيرمي ثلاثة حلول: أحدها أننا وحيدون في مجرّة درب التبانة لأن أحد عوامل معادلة دريك ضئيل بقدر لا يكاد يُذكر. وثانيها أن الأساس المنطقي لفيرمي غير صحيح؛ فلأسباب عديدة، قد لا تُبَادِر الحضارات باستعمار المجرة. وأخيراً، أن الحضارات موجودة لكنها تُخفِي وجودها عنّا

(أو عن أغلبنا). ولا يروق الخيار الأخير تحديداً للعلماء، لأنه فرضية ارتجالية يستحيل إخضاعها للاختبار، لكنها محبّبة لدى كُتَّاب الخيال العلمي والصحف الصفراء، ومحبّبة كذلك، بحسب استطلاعات الرأي، لدى ثُلث الأمريكيين البالغين الذين يؤمنون بأنّ الكائنات الفضائية زارتنا بالفعل. والخياران الأول والثاني هما المنطقيان. من الواضح أن جميع الجهود المبذولة في سياق البحث عن حياة في مكان آخر تتعلق بمسألة ما إذا كنا وحدنا في هذا الكون، وترتبط بالحل الأول. إذا نجحت جهود البحث عن حياة خارج الأرض، فربما نستخلص رؤى ثاقبة أيضاً من الحضارات الأخرى، إن استطعنا فهم إشاراتها. أمَّا في الوقت الراهن، فإن الحياة الوحيدة المعروفة هي التي نعيشها هنا. وشأننا شأن فيرمي، لا يسعنا إلا أن نتساءل: «أين هم؟».

الفصل الثامن جدالات وتوقّعات

الفصل الثامن
جدالات وتوقّعات

فرضية الأرض النادرة

تثير أسئلة علم الأحياء الفلكية الكبيرة المفتقرة إلى إجاباتٍ الكثير من الجدل. وقد ظهر جدال في عام 2000 عندما نشر بيتر وارد (Peter Ward) ودون براونلي (Don Brownlee)، زميلَيَّ في جامعة واشنطن في سياتل، كتاباً من أكثر الكتب مبيعاً، وهو «الأرض النادرة» (*Rare Earth*). كانت فرضيتهما حول الأرض النادرة تدور في الأساس حول فكرة أن الظروف الطارئة التي سمحت بوجود حياة متطوّرة على الأرض كانت استثنائية جداً لدرجة أن الأرض ربما تُؤوي الحياة الذكية الوحيدة في مجرّة درب التبانة. وكان من بين حججهما أن من حسن حظ الأرض وقوعها في المكان الصحيح في المجرّة، ووجود المشتري في مجموعتنا الشمسية لاقتناص المذنبات التي لولا وجوده لكان من الممكن أن تصطدم بالأرض، وقيام الأرض بإعادة تدوير غير عادية للمواد المتطايرة بواسطة الصفائح التكتونية للحفاظ على سلامة الغلاف الجوي، والظروف الطارئة التي حبتِ الأرض بغلاف جوي غني بالأكسجين، وحظها الذي ساق إليها قمراً كبيراً يعمل على استقرار الميل المحوري للأرض واستقرار مناخها أيضاً.

كانت فرضية الأرض النادرة هجوماً عنيفاً شُنَّ على مبدأ كوبرنيكوس. فقد كانت فكرة ذلك المبدأ (المسمى تيمناً باسم نيكولاس كوبرنيكوس، الذي أطاح نظامه المتمركز حول الشمس الأرضَ عن مكانها المتصوَّر كمركز للكون) تؤكّد أنه لا يوجد شيء يتميّز به موقعنا في الكون. لاحظ علماء الفلك عدة عوامل تُعضد هذا المبدأ. أولاً، إن الأرض هي بالتأكيد كوكب من العديد من الكواكب الصخرية في الكون. علاوة على ذلك، فإن شمسنا، وهي نجم من النوع «G»، ليست متميّزة لأن واحداً من كل عشرة نجوم تقريباً من النوع «G». وإننا نعيش أيضاً في موقع رتيبٍ في المجرّة، على طول واحد من الأذرع الحلزونية العديدة. وأخيراً، إن مجرّتنا ليست مميّزة بين كثير من مجرات الكون المنظور. وكما قال ستيفن هوكينغ (Stephen Hawking): «إن الجنس البشري مجرد غثاء كيميائي موجود على كوكب متوسّط الحجم، يدور حول نجم عاديٍّ جداً في الضاحية الخارجية لمجرّة من ضمن مئة مليار مجرة».

لاحظ أنصارُ مبدأ كوبرنيكوس أيضاً كيف يسلّط التقدم الكبير للعلوم الضوء على حماقة افتراض أننا متميّزون. وما علينا سوى التفكير في أطروحة غاليليو الفلكية «الرسول النجمي» (*The Starry Messenger*) ا(1610)، التي تضمّنت أرصاده لأقمار المشتري وسطح القمر، مبيّنة أن هذه الأجرام لم تكن من الكمالات السماوية كما افترض الفلاسفة اللاهوتيون، وإنما تم تفسيرها بالفيزياء ذاتها التي لدينا على الأرض. وبالمثل، أطاح كتاب داروين «أصل الأنواع» (*Origin of Species*) ا(1859) فكرةَ أن البشر منفصلون عن بقية الكائنات الحية.

تكمن مشكلة فرضية الأرض النادرة في أنها تفترض الإحاطة بقدر مفرط من المعرفة حول صلاحية الأجرام السماوية للسُكنى، في حين أن كثيراً من المعلومات غير مؤكَّدة في الواقع. فعلى سبيل المثال، اكتُشف في الآونة الأخيرة أن طواف النجوم في السماء يعني أن مفهوم المنطقة الصالحة للسكنى في المجرة أقل واقعية مما كان يُعتقد سابقاً. وتُثبت نتائج بعثة كبلر، التي أرسلتها وكالة ناسا، أيضاً أن الكواكب شائعة حول النجوم الأخرى، ومنها أجرام سماوية كثيرة في حجم كوكب المشتري. وطُعِن أيضاً في صحة الحجة القائلة بأن وجود كوكب بحجم المشتري في المكان المناسب تماماً يقلّل من معدل اصطدام المذنبات أو الكويكبات بالأرض. لا شك أن المشتري يستقطب بجاذبيته بعض الأجسام المارقة في الفضاء كمكنسة هوائية كونية. ففي عام 1994، اصطدم المذنب شوميكر ليفي 9 بالمشتري، بينما شوهدت خلال عامي 2009 و2010، ندوب آثار صدمات أخرى على المشتري. ومن الثابت أن المشتري يساعد في تحويل وإبعاد المذنبات الآتية من هالة من تلك الأجرام الجليدية، تسمى سحابة أورط (Oort Cloud)، تحيط بالمجموعة الشمسية على بُعد 500 ألف وحدة فلكية. ومع ذلك، فإن الكويكبات والمذنبات القريبة من الأرض من داخل نطاق المجموعة الشمسية تمثّل أكثر من 75 في المئة من التهديدات الخطيرة للأرض، وفي وسع المشتري أن يزعزع مسار هذه الأجرام. ومن ثمَّ فإن المشتري يُعد صديقاً ذا وجهين. وتشير بعض الحسابات إلى أن المشتري هو في الواقع عدو محض وليس صديقاً.

إن الحجج الأخرى لفرضية الأرض النادرة غامضة أيضاً. ففي المجموعة الشمسية، تحتوي الأرض بشكل فريد على صفائح تكتونية. ومع ذلك، بالنسبة للصفائح التكتونية، يجب أن يكون الكوكب كبيراً بما يكفي لتكون به حرارة داخلية كافية لدفع حركة الصفائح، وربما يحتاج إلى مياه البحر لتبريد صفائح المحيطات وتليين حركتها. وفي المجموعة الشمسية، كوكب الأرض فقط هو المؤهل لذلك. لكن هذا لا يعني أن الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض في المناطق الصالحة للسُكنى قد لا تكون مناسبة هي الأخرى لامتلاك صفائح تكتونية مماثلة.

على الرغم من صحة فرضية الأرض النادرة في القول بأن الكواكب التي لا تحتوي على قمر كبير ستعاني من انحرافات في الميل المحوري أكبر من كوكب الأرض، فإن التقلّبات المناخية عند خطوط العرض المنخفضة قد لا تكون خطيرة. وحقيقة الأمر أن الأغلفة الجوية الأكثر سمكاً، والمحيطات الأكثر اتساعاً، ومعدّلات الدوران الأكثر انخفاضاً للكوكب الخارجي يمكن أن تقلّل الاختلافات المناخية بين القطب والمدارات، الناجمة عن المَيل المتغير. وأخيراً، فإن مسألة عدم تراكم الأكسجين على كواكب أخرى شبيهة بالأرض قد تسير في عكس الاتجاه المفترض في فرضية الأرض النادرة. فقد تكون بعض الكواكب مناسبة للأغلفة الجوية الغنية بالأكسجين أكثر

من الأرض لأن براكينها تنبعث منها نسبة أقل من الغازات التي تتفاعل مع الأكسجين. ومن ثمّ قد يتراكم فيها الأكسجين بسهولة كبرى.

إن ما يبدو صحيحاً حقاً بالنسبة لفرضية الأرض النادرة هو أن الحياة الشبيهة بحياة الميكروبات يجب أن تكون أكثر شيوعاً من الحياة الذكية. ولدى الميكروبات مجموعة رائعة من عمليات الأيض ويمكن أن تعيش في بيئات أكثر تنوّعاً بكثير من البيئات الكائنات الحية المعقدة. لكن أيَّ تصريحات محدّدة حول انتشار الحياة المعقدة - بطريقة أو بأخرى - تفتقر ببساطة إلى البيانات التي تؤيّدها، ولا بد أن نشكّ فيها. وكما قال كارل ساغان في تصريحه الشهير: «من المفيد أن يظل عقلك منفتحاً على الآخرين، لكن ليس منفتحاً لدرجة أن تفقد عقلك».

آفاق مستقبل علم الأحياء الفلكية والعثور على حياة في مكان آخر

تكمن الإثارة في علم الأحياء الفلكية في أنه يحاول الإجابة عن أسئلة مثل أصل الحياة وما إذا كنا وحدنا في الكون. وفي ظل التطوّرات التي يشهدها مجال التقنية، من المرجح بشكل متزايد أن تحدث اكتشافات كبرى في العقود المقبلة.

ففي إطار فهم نشأة الحياة الأولى، من المحتمل أن نتمكّن من تخليق الجينومات الحقيقية الذاتية الاستنساخ في المختبر. وهذا من شأنه أن يوفر رؤى عظيمة لمعرفة أصل الحياة. وثمة مجموعات عديدة من العلماء يدرسون عالم الحمض النووي الريبي وأنواعه المختلفة. وهناك أيضاً مشاريع للحفر بعمق في الصخور الرسوبية القديمة في جنوب أفريقيا وأستراليا، وستحقّق بالتأكيد اكتشافات جديدة عن الحياة والبيئة الأوليَين.

وفي المجموعة الشمسية، يجب أن يكون قمر إنسيلادوس من أهم أولويات وكالات الفضاء العالمية. إن إنسيلادوس لديه مصدر للطاقة (الحرارة المدِّية)، ومواد عضوية، ومياه سائلة؛ وهذه قائمة تضاهي كتاباً دراسياً لكثرة ما تحويه من تلك الخصائص الضرورية للحياة. علاوة على ذلك، قدّمت الطبيعة لعلماء الأحياء الفلكية أكبر وجبة مجانية؛ ألا وهي التيارات التي تدفع بمواد إنسيلادوس العضوية إلى الفضاء. ولا شك في توافر التقنية اللازمة لبناء مركبة فضائية تحلّق بالقرب من إنسيلادوس وتأخذ عيّنات من المواد العضوية المندفعة في التيارات. والأفضل من ذلك، أنه يمكن إعادة المادة العضوية إلى الأرض لتحليلها.

في الواقع، إن المركبات الفضائية الخاصة بجمع عيّنات من الفضاء والعودة بها إلى الأرض، وتسمى بعثات العودة بالعيّنات، هي المستقبل في فهم تاريخ كوكبَيْ المريخ والزهرة ومعرفة ما إذا كان أيٌّ من هذين الكوكبَيْن مأهولاً في الماضي. ومن المتوقّع في المستقبل البعيد تنفيذ بعثة عودة بالعينات من كوكب الزهرة، لكن ثمة بعثة أخرى للمريخ تمثل هدفاً استراتيجياً للبرامج الحالية لوكالة ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية.

ربما يكون قمر يوروبا، الذي يدور حول المشتري، أفضل فرصة للحياة. وستكون الخطوة الأولى إرسال مسبار يدور حول يوروبا لدراسة القمر بالتفصيل وتحديد سمك الجليد فوق محيط أو بحيرة تحت سطحه الجليدي. وقد تتضمن الخطوات التالية مركبات هبوط، وربما روبوتات لإذابة الجليد باستخدام مولدات الإشعاع الحراري. ويتصوّر المرء في نهاية المطاف غوّاصات تغوص في أعماق محيط على القمر يوروبا.

بالإضافة إلى إنسيلادوس، يُعدُّ تيتان هدفاً لعلم الأحياء الفلكية بين أقمار زحل. ويمكن تحقيق طفرة علمية كبيرة إذا تمكّنت مركبة هبوط بحري - وهي نوع من القوارب المستخدمة بين الكواكب - من الطفو على البحيرات في المناطق القطبية من تيتان ومعرفة المواد التي تشكّل السوائل العضوية. علاوة على ذلك، يمكن لمسبار يدور حول تيتان القيام بهذا النوع من الاستطلاع الذي سيحدد عمق محيط تيتان تحت السطحي ويدرس سطح تيتان.

من الأشياء المؤكّدة في المستقبل أن اكتشافات الكواكب الخارجية ستظل تثير الاهتمام بعلم الأحياء الفلكية. وأتوقع اكتشاف العديد من الكواكب الشبيهة بالأرض داخل المنطقة الصالحة للسُكنى من النجوم الأخرى، وكواكب ميتة لها أغلفة جوية يشكِّل ثاني أكسيد الكربون السواد الأعظم من مكوّناتها، وعوالم مائية مغطاة بالكامل بمحيطات متلألئة، وكواكب شابة شبيهة بالزهرة تتبخر محيطاتها في الفضاء بسبب أثر الاحتباس الحراري المنفلت.

عندما ظهر علم الأحياء الفلكية بوصفه فرعاً من فروع المعرفة في التسعينيات، شكَّك بعضهم في مستقبله وتساءلوا عما إذا كان مجرد بدعة زائلة، ربما بسبب الإحباط الناجم عن عدم العثور على حياة خارج الأرض بسرعة أو الإخفاق في الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بأصل الحياة. ومع ذلك، فإن اكتشاف كواكب خارجية بحجم الأرض في المناطق الصالحة للسُكنى سيؤكّد أن إمكانية وجود الحياة في مكان آخر ستصبح أكثر ارتباطاً بهذا العلم من أيِّ وقت مضى. لقد نشأ علم الأحياء الفلكية ليبقى.

مراجع إضافية

مراجع إضافية

الفصل الأول: ما علم الأحياء الفلكية؟

ثمة مقدمات لعلم الأحياء الفلكية أطول بكثير متوافرة في الكتب الأكاديمية التالية:

J. O. Bennett. G. S. Shostak. *Life in the Universe*. (San Francisco:
.(Pearson Addison-Wesley, 2012

D. A. Rothery et al. *An Introduction to Astrobiology*. (Cambridge:
.(Cambridge University Press, 2011

K. W. Plaxco, M. Gross. Astrobiology: *A Brief Introduction*.
.((Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2011

J. I. Lunine. Astrobiology: *A Multidisciplinary Approach*. (San
.(Franciso: Pearson Addison Wesley, 2005

W. T. Sullivan, J. A. Baross (eds). *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*. (Cambridge: Cambridge University Press,
.(2007

ورد وصف تطوّر علم الأحياء الفلكية من الخمسينيات فصاعداً في الكتاب التالي:

S. J. Dick, J. E. Strick. *The Living Universe: NASA and the Development of Astrobiology*. (New Brunswick, NJ: Rutgers .(University Press, 2004

وثمة كتاب قديم عن طبيعة الحياة:

E. Schrodinger. *What Is Life?* (1944; Cambridge: Cambridge .(University Press, 2012

الفصل الثاني: من الغبار الكونيّ إلى الكواكب... أماكن للحياة

ثمة مناقشة لنظرية الانفجار العظيم الحديثة سهلة القراءة وردت في المقالة التالية:

C. Lineweaver, T. Davis. 2005. Misconceptions about the Big Bang. .Scientific American 292: 36-45

وهناك سرد شهير لمحاولات آرثر هولمز معرفة عمر الأرض ورد في الكتاب التالي:

C. Lewis. *The Dating Game: One Man’s Search for the Age of the* .(*Earth*. (Cambridge: Cambridge University Press, 2012

الفصل الثالث: أصول الحياة والبيئة

الكتاب التالي يحوي وصفاً لعِلم أصل الحياة:

R. M. Hazen. Genesis: *The Scientific Quest for Life’s Origin*. .((Washington, DC: Joseph Henry Press, 2005

وثمة وصف واضح للتطوّر المبكّر للحياة على الأرض ورد في الكتاب التالي:

A. H. Knoll. Life on a Young Planet: *The First Three Billion Years of Evolution on Earth*. (Princeton: Princeton University Press, 2003).

الفصل الرابع: من الوحل إلى السموّ

تم تناول موضوعات تكوُّن الأرض وتطوّرها وصلاحيتها للسُكنى في الكتاب التالي:

C. H. Langmuir, W. S. Broecker. *How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind*. (Princeton: Princeton University Press, 2012).

الفصل الخامس: الحياة: كيف يصنع الجينوم
جينومات أفضل وأكثر عدداً

ثمة كتاب أكاديمي تمهيدي واسع الاستخدام عن علم الأحياء الدقيقة الحديث:

M. T. Madigan et al. *Brock Biology of Microorganisms*. (San Francisco: Benjamin Cummings, 2012).

وهناك وصف لآثار الحياة على كيمياء الأرض على المستوى العالمي مذكور في الكتاب الأكاديمي التالي:

W. H. Schlesinger, E. S. Bernhardt. *Biogeochemistry, Third Edition: An Analysis of Global* Change. (San Diego: Academic Press, 2013).

الفصل السادس: الحياة في المجموعة الشمسية

كواكب المجموعة الشمسية وقابليتها للسُكنى موصوفة في الكتاب الأكاديمي التالي:

J. J. Lissauer, I. de Pater. *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

الفصل السابع: عوالم نائية وشموس بعيدة

هناك كتاب سهل القراءة يناقش موضوع البحث عن الكواكب الخارجية الصالحة للسُكنى:

J. F. Kasting. *How to Find a Habitable Planet*. (Princeton: Princeton University Press, 2010).

الفصل الثامن: جدالات وتوقّعات

الكتاب المثير للجدل لكنه يسحر الألباب، الذي يناقش موضوع ندرة الحياة المعقّدة، هو:

P. D. Ward, D. Brownlee. *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*. (New York: Copernicus, 2000).

الفهرس

الفهرس

1. الامتزاز هو العملية التي تلتصق بها جزيئات غاز أو سائل أو مذاب بسطح مادة صلبة على شكل غشاء رقيق - المترجمة. ↑

Table of Contents